РУКОВОДСТВА И ПОСОБИЯ
ДЛЯ ТЕХНИКУМОВ И ВТУЗОВ

проф. С. И. КУРБАТОВ

ДИНАМОМАШИНЫ И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Научно-Технической Секцией Государственного Ученого Совета допущено в качестве пособия для техникумов



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА * 1926 * ЛЕНИНГРАД


1-я ОБРАЗЦОВАЯ
ТИПОГРАФИЯ
ГОСУДАРСТВЕННОГО ИЗДАТЕЛЬСТВА
МОСКВА - ПЯТНИЦКАЯ, 71
Главлит 46749.
Гиз 14158. Тираж 4000.

ПРЕДИСЛОВИЕ.

Настоящий краткий курс динамомашин и электродвигателей постоянного тока имеет двоякое назначение: во-первых, служить руководством для слушателей специальных электротехнических техникумов и, во-вторых, служить пособием для инженеров и техников и других специальностей, желающих ближе познакомиться с этой областью электротехники.

Предполагая наличие специальных электро-машинных лабораторий в правильно поставленных электротехникумах с подбором нормальных типов электрических машин и с возможностью поэтому для слушателей познакомиться с конструктивным выполнением этих машин в лабораторной практике, автор почти совершенно опустил всю конструктивную часть машин за исключением некоторых отдельных деталей. Для практических инженеров и техников недостаток конструктивных описаний пополняется знакомством с конструктивным устройством машин из их повседневной практики.

Имея в виду знакомство слушателей техникумов с элементами высшей математики и векторного изображения переменных величин, автор считал правильным использовать это при изложении материала курса.

Значительное внимание в курсе уделяется испытаниям машин. Что касается расчетной стороны, то здесь даны лишь основания расчета и методы подсчета только отдельных элементов электрических машин постоянного тока, в силу того, что большинству техников, да и инженеров, в их практической деятельности приходится лишь ремонтировать или перестраивать машины. Вследствие этого методы расчета новых машин, а тем более расчета новых типов и серий машин, специально в курсе не разбираются. Все же автор надеется, что и приведенных в курсе расчетных данных окажется достаточно, чтобы под

руководством преподавателя слушатель мог с помощью этого курса сделать просчет и новой машины.

Ввиду недостатка на русском языке аналогичных руководств автор надеется, что настоящее издание окажется полезным для технической школы и практиков.

С. Курбатов.

Москва. 15 июля 1924 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

ГЛАВА I.

Введение.

Основные законы, на которых основаны изучение и расчет электрических машин.

ГЛАВА II.

Электродвижущая сила динамомашины постоянного тока.

ГЛАВА III.

Якоря эл. машин постоянного тока и их обмотки.

ГЛАВА IV.

Магнитная система.

ГЛАВА V.

Коммутация электрических машин постоянного тока.

ГЛАВА VI.

Характеристичные кривые эл. машин постоянного тока.

ГЛАВА VII.

Потери и коэффициент полезного действия в эл. машинах постоянного тока.

ГЛАВА VIII.

Нагревание электрических машин постоянного тока.

ГЛАВА IX.

Исследование распределения магнитного поля под полюсами и магнитного рассеяния.

ГЛАВА X.

Опытное исследование условий коммутации.

ДИНАМОМАШИНЫ И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

ВВЕДЕНИЕ.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ, НА КОТОРЫХ ОСНОВАНЫ ИЗУЧЕНИЕ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН.

1. Закон Ома.

Принимая обычные в электротехнике обозначения для электрических величин, этот закон можно выразить следующим соотношением:

$$i = \frac{e_k}{r}, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

где i — сила тока в проводнике,

e_k — напряжение на зажимах проводника,

r — сопротивление проводника.

Для случая, когда кроме напряжения e_k, приложенного к концам проводника, в самом проводнике возбуждаются еще некоторые электродвижущие силы $e_1 + e_2 + e_3 + \ldots = \Sigma e$ (знак $+$ для одного направления с приложенным напряжением e_k и знак — для противоположного направления), закон Ома имеет несколько более сложную форму:

$$i = \frac{e_k + \Sigma e}{r} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

2. Закон электромагнитной индукции.

Электродвижущая сила, индуктируемая в проводнике, находящемся в магнитном поле, при изменении магнитного потока на величину $d\Phi$ за промежуток времени dt, пропорциональна изменению потока за единицу времени и будет равна:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} 10^{-8} \text{ вольт} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

При передвижении прямолинейного проводника длиной l *см* в однородном магнитном поле с плотностью $B=\frac{\Phi}{bl}$, с равномерной скоростью $v=\frac{ds}{dt}$, и при условии, что направление поля, ось проводника и направление движения взаимно перпендикулярны, эл.-дв. сила, индуктируемая в проводнике, будет равняться:

$$e=B\cdot l\cdot v\cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

Здесь $b\cdot l$ есть площадь сечения магнитопровода, перпендикулярного к направлению магнитных линий, b и l в отдельности — размерности этого сечения в двух перпендикулярных направлениях, ds — элементарный участок пути, пройденный за элемент времени dt (движение проводника предполагается в направлении размера b). Если мы имеем не один проводник, а N проводников, включенных последовательно и так, чтобы эл.-дв. силы, индуктирующиеся в них, складывались, получим выражение для эл.-дв. силы:

$$e=N\cdot B\cdot l\cdot v\cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad \ldots\ldots \quad (5)$$

В общей же форме закон индукции для N проводников, сцепленных с изменяющимся магнитным потоком, выразится в форме:

$$e=-N\frac{d\Phi}{dt}\cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad \ldots\ldots \quad (6)$$

Направление индуктированной эл.-дв. силы определяется по правилу трех пальцев правой руки (правилу Флемминга):

Если большой палец расположить по направлению движения проводника, указательный — по направлению магнитного потока, то средний палец покажет направление индуктированной эл.-дв. силы и тока (все три пальца должны быть расположены в трех взаимно перпендикулярных направлениях).

3. Взаимодействие между полем и током (закон Био — Савара).

Поле с магнитной индукцией B оказывает на находящийся в нем проводник длиной в l *см* с протекающим по нему током i ампер давление, величина которого равна:

$$P=\frac{liB}{9{,}81}\cdot 10^{-6} \text{ кг} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

Направление, в котором эта сила заставляет проводник двигаться, определяется тем же правилом трех пальцев (Флемминга), но левой руки, при чем соответствующие пальцы левой руки располагаются по тем же направлениям, по которым в предыдущем случае направлялись пальцы правой руки.

4. Основные соотношения между магнитной силой и магнитной индукцией.

Основные соотношения между магнитной силой (H) и магнитной индукцией (B) выражаются формулой:

$$B = H + 4\pi J, \quad \quad (8)$$

где J есть „интенсивность намагничивания". Отношение $\mu = \frac{B}{H}$ мы называем магнитной проницаемостью. В магнитных телах величина J (а не B) стремится к конечному значению насыщения. Для хорошего железа $4\pi J$ максимально имеет значение до 22 000. (Юинг) для мягкого железа достиг значения $B = 45\,000$. В практике кривые намагничивания даются в виде диаграмм:

$$B = f(H) \text{ или } B = f(aw),$$

где aw = число ампер-витков, создающих магнитный поток с плотностью (индукцией) в B магнитных линий на 1 $см^2$ поперечного сечения.

5. Сила притяжения между двумя параллельными намагниченными поверхностями.

Две магнитные полюсные поверхности, по F $см^2$ каждая, между которыми образовалось однородное магнитное поле с магнитной индукцией B, взаимно притягиваются с силой:

$$P = \frac{B^2 F}{8\pi \cdot 9{,}81} \cdot 10^{-5} \text{ кг}, \quad \quad (9)$$

что дает в круглых цифрах $P = 1 \frac{кг}{см^2}$ при $B = 5\,000$.

Поэтому приближенно можно написать:

$$P = F \frac{B^2}{5\,000^2} \text{ кг} \quad \quad (10)$$

Эта сила независима от расстояния между плоскостями, если только поле между ними однородно, что впрочем имеет место лишь в случае, когда расстояние между полюсами относительно невелико по сравнению с площадью полюсных поверхностей.

6. Закон магнитной цепи.

Магнитная индукция в отдельных участках замкнутой магнитной цепи и ампер-витки, создающие магнитный поток в этой цепи, связаны между собой следующим соотношением:

$$0{,}4\pi \cdot iw = \frac{B_1}{\mu_1} l_1 + \frac{B_2}{\mu_2} l_2 + \frac{B_3}{\mu_3} l_3 + \dots \quad (11)$$

где B, μ, l — соответственно величины магнитной индукции, магнитной проницаемости и длины отдельных участков, на которые можно разбить магнитную цепь, iw — число ампер-витков, сцепленных с данной магнитной цепью.

Величина $0{,}4\pi \cdot iw$ играет в магнитной цепи ту же роль, что и эл.-дв. сила в электрической цепи, и носит поэтому название магнитодвижущей силы.

Величина магнитного потока определяется, с одной стороны, магнитодвижущей силой $0{,}4\,\pi \cdot iw$, а с другой стороны, магнитным сопротивлением R_m пути, по которому проходит магнитный поток (магнитопровода). Подобно закону Ома в электрической цепи, здесь мы имеем следующее соотношение между указанными величинами:

$$\Phi = \frac{\text{магнитодвиж. сила}}{\text{магнитн. сопр.}} = \frac{04,\pi \cdot iw}{R_m}.$$

Сопротивление магнитной цепи R_m также, подобно сопротивлению электрической цепи, равно:

$$R_m = \frac{l_m}{\mu Q_m},$$

где l_m — длина магнитопровода,

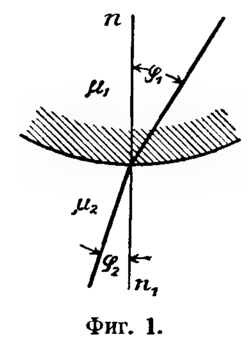
Q_m — сечение „ ,

μ — магнитная проницаемость среды, по которой проходит магнитный поток.

7. Закон преломления магнитных силовых линий.

При переходе из одной среды, с магнитной проницаемостью μ_1, в другую среду, с магнитной проницаемостью μ_2, магнитные линии преломляются по закону (см. фиг. 1):

$$\frac{\operatorname{tg}\varphi_1}{\operatorname{tg}\varphi_2}=\frac{\mu_1}{\mu_2} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (12)$$



Фиг. 1.

При переходе силовых линий из железа в воздух, при большой разнице в магнитной проницаемости железа и воздуха, получается, что линии из железа выходят почти перпендикулярно к поверхности раздела. Этот закон важен при изучении вопроса о полях рассеяния.

8. Электродвижущая сила самоиндукции.

Эл.-дв. сила самоиндукции некоторой цепи тока равна:

$$e_s=-L\frac{di}{dt}, \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (13)$$

где L — коэффициент самоиндукции этой цепи.

Для синусоидальных токов эл.-дв. сила самоиндукции

$$e_s=2\pi c \cdot L \cdot I=\omega L \cdot I \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (14)$$

(реактивное напряжение), где c — число периодов тока.

Энергия, накопленная в магнитной цепи, равна:

$$A=\frac{LI^2}{2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (15)$$

Эта величина аналогична механической „живой силе".

Если измерять L в генри, I — в амперах, то A получается в ваттсекундах.

9. Некоторые свойства синусоидальной кривой.

Если мы положим максимальную ординату синусоидальной кривой равной 1 и длину полуволны равной π, то получаются следующие соотношения:

а) Средняя арифметическая ордината полуволны

$$y_m = \frac{2}{\pi} = 0{,}638.$$

б) Средняя квадратичная (эффективное значение)

$$y_e = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707.$$

в) Площадь полуволны $F = 2$.

г) Площадь $\sin^2$ — кривой $F_1 = \frac{\pi}{2}$.

д) Коэффициент формы кривой $f = \frac{y_e}{y_m} = 1{,}11$.

Периодические кривые могут часто заменяться „эквивалентными“ синусоидальными кривыми с одинаковым эффективным действием.

ГЛАВА ВТОРАЯ.

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ДИНАМОМАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

1. Величина электро движущей силы, индуктированной в электрической машине постоянного тока.

Из основного закона электромагнитной индукции известно, что величина электродвижущей силы, индуктирующейся в проводнике, перемещающемся в магнитном поле, определяется числом магнитных линий, перерезываемых этим проводником в единицу времени:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (16)$$

Динамомашина представляет собой ряд последовательно соединенных между собой проводников, движущихся при вращении машины в магнитном поле. Каждый проводник за один поворот двухполюсной машины дважды пересекает полный поток Φ, выходящий из северного полюса в южный (см. фиг. 2). Если машина делает в одну минуту n оборотов, или в одну секунду $\frac{n}{60}$ оборотов, то число перерезанных проводником в одну секунду магнитных линий будет $2\Phi\frac{n}{60}$. Следовательно индуктированная в этом проводнике при равномерном его вращении со скоростью $\frac{n}{60}$ оборотов в секунду в магнитном потоке силою Φ магн. лин. эл.-дв. сила будет равна:

Фиг. 2.

$$e = 2\Phi\frac{n}{60} \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (17)$$

В двухполюсных динамомашинах постоянного тока все проводники якоря (вращающейся части машины) обычно делятся на две равные части (параллельные цепи) так, что электродвижущие силы, индуктирующиеся в отдельных проводниках одной части, складываются между собой, равным образом в проводниках другой части — между собой. Обе цепи соединяются между собой параллельно так, что индуктированные в них токи подводятся к одним и тем же щеткам, через которые эти токи, складываясь, отводятся во внешнюю цепь, например к лампам освещения или моторам. Таким образом в каждой параллельной цепи будет $\frac{1}{2}N$ последовательно между собою включенных проводников. Все проводники на якоре расположены параллельно друг другу (паралельно оси якоря) и имеют одинаковую длину. При вращении каждый из них перемещается совершенно одинаковым образом по отношению к магнитному полю, и, следовательно, в каждом из них индуктируется одинаковая эл.-дв. сила:

$$e = 2\Phi\frac{n}{60}\cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad \ldots\ldots \quad (18)$$

Суммарная эл.-дв. сила, которая будет индуктироваться во всех $\frac{1}{2}N$ последовательно соединенных проводниках каждой параллельной цепи, будет равна:

$$e = 2\Phi\frac{n}{60}\cdot\frac{N}{2}\cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad \ldots\ldots \quad (19)$$

Эта эл.-дв. сила и будет подводиться к зажимам разноименных щеток машины при холостом ходе, уменьшаясь на величину омического падения напряжения внутри машины при нагрузке.

Если машина имеет не два полюса, а $2p$ полюсов, при чем поток каждого из них равен Φ, то число магнитных линий, перерезываемых каждым проводником за один оборот, будет уже не 2Φ, а $2p\Phi$, и результирующая эл.-дв. сила машины станет равной:

$$e = 2p\Phi\frac{n}{60}\cdot\frac{N}{2}\cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad \ldots\ldots \quad (20)$$

В некоторых динамомашинах, особенно в многополюсных, все проводники делятся не на две параллельные цепи, а на большее число цепей, например $2a$, индуктированные токи в которых

суммируются и через одноименные щетки отводятся во внешнюю цепь. В этом случае, очевидно, число последовательно соединенных проводников, определяющее напряжение между разноименными щетками, а следовательно и всей машины, будет уже не $\frac{1}{2}N$, а $N/2a$, где a есть число пар параллельных цепей в обмотке якоря динамомашины. Эл.-дв. сила машины представится в этом общем случае в виде:

$$E = 2p\Phi\frac{n}{60}\cdot\frac{N}{2a}\cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad \ldots\ldots \quad (21)$$

или

$$E = \Phi\cdot N\cdot\frac{n}{60}\cdot\frac{p}{a}\cdot 10^{-8} \text{ вольт,} \quad \ldots\ldots \quad (22)$$

выражение, которым обычно и пользуются при расчете величины эл.-дв. силы машин постоянного тока.

Пример. Дана машина, в которой:

$$\Phi_{\text{полезн}} = 7{,}08\cdot 10^6,$$
$$N = 390,$$
$$n = 250 \text{ в мин.},$$
$$2p = 6,$$
$$2a = 6.$$

Требуется определить ее эл.-дв. силу. По приведенной выше формуле имеем:

$$E = \Phi N\frac{n}{60}\cdot\frac{p}{a}\cdot 10^{-8} =$$

$$= 7{,}08\cdot 10^6\cdot 390\cdot\frac{250}{60}\cdot\frac{3}{3}\cdot 10^{-8} = 115 \text{ вольт.}$$

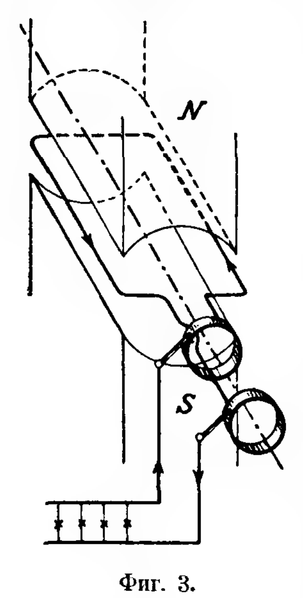
2. Генерирование тока в динамомашинах постоянного тока. Принцип устройства коллектора.

Остановимся несколько на процессе генерирования тока в динамомашинах.

Простейшим и элементарным видом всякого генератора был бы виток проволоки, вращающийся между двумя разноименными полюсами (см. фиг. 3).

Если применить к этому витку правило Флемминга и определить направление индуктированной в нем эл.-дв. силы, то легко установить, что, когда одна сторона проволоки проходит

под одним плюсом (например северным — N), направление индуктированной эл.-дв. силы одно, а когда та же самая сторона витка проходит под другим полюсом (южным — S), направление индуктированной в ней эл.-дв. силы меняется на обратное. В другой стороне витка индукция действует в обратном направлении. При указанном соединении сторон обе эл.-дв. силы, индуктированные в них, в каждый момент складываются между собой. Таким образом в такой элементарной машине при вращении витка получается переменная эл.-дв. сила, а при замыкании цепи на какое-нибудь сопротивление потечет переменный же ток. Этот ток может отводиться из машины во внешнюю сеть (например лампы накаливания), если концы витка присоединить к особым кольцам (см. фиг. 3), на которые наложить щетки. От щеток идет отвод во внешнюю сеть. Эл.-дв. сила переменна не только по направлению, но и по величине. В самом деле, даже если предположить, что распределение магнитного поля между полюсами будет совершенно равномерное, то все же число перерезываемых в единицу времени каждым проводником магнитных линий в течение одного и того же оборота не будет оставаться постоянным. Оно будет меняться в зависимости от угла ωt, образуемого линией, соединяющей мгновенное положение проводника с центром вращения, и горизонтальной осью. Действительно, индуктированная в проводнике эл.-дв. сила зависит от числа перерезываемых проводником за единицу времени магнитных линий. Число перерезываемых линий, очевидно (см. фиг. 4), пропорционально перемещению s проводника в направлении, перпендикулярном направлению магнитных линий, $e \equiv s$ [1]). Действительное перемещение проводника при вращении его около оси O' за этот же промежуток времени будет определяться дугой ab, которую при поворотах на малый угол можно приравнять прямой ab'.



Фиг. 3.

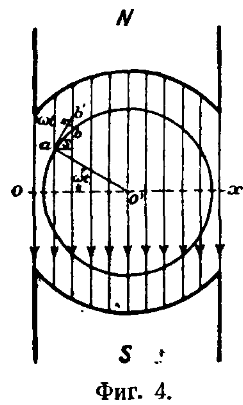
[1]) $\equiv$ знак пропорциональности.

Тогда $e = s = ab' \sin \omega t = \text{const} \cdot \sin \omega t$ (так как при равномерном вращении ab есть величина постоянная).

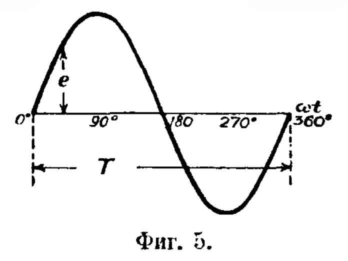
Отсюда, обозначив через e_{max} — максимальное значение индуктированной в проводнике эл.-дв. силы, получим для мгновенных значений эл.-дв. силы при различных положениях проводника выражение:

$$e = e_{max} \cdot \sin \omega t \quad \ldots \ldots \ldots \quad (23)$$

В силу симметричности расположения второго проводника нашего витка (см. фиг. 3) относительно оси вращения машины второй проводник в каждый момент будет занимать по отношению к южному полюсу такие же относительные положения, как первый проводник по отношению к северному полюсу. Таким образом индуктированная в целом витке (из 2 проводников) эл.-дв. сила может быть представлена тем же выражением $e = e_{max} \sin \omega t$, если здесь под e подразумевать мгновенное значение эл.-дв. силы, индуктированной в двух проводниках нашего витка, и под e_{max} — максимальное значение суммарной эл.-дв. силы, индуктированной в обоих проводниках.



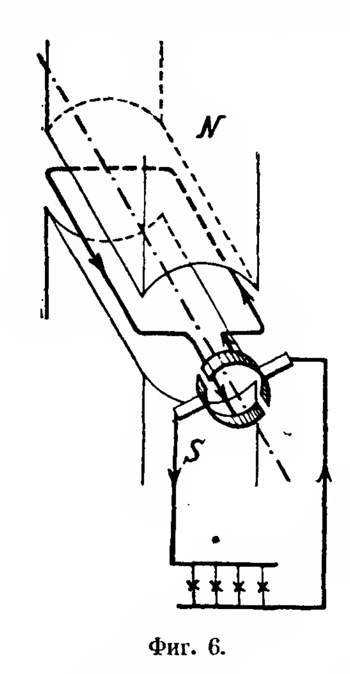
Фиг. 4.



Фиг. 5.

При прохождении проводников через так называемую нейтральную ось машины (ось ox на фиг. 4, перпендикулярную направлению магнитного потока и проходящую через центр окружности якоря), когда угол ωt принимает значение 0° или 180°, значение эл.-дв. силы e равно нулю; при прохождении под серединой того или другого полюса, при $\omega t = 90°$ или 270°, величина e принимает свое максимальное значение того или другого знака $\pm e_{max}$, в зависимости от полярности полюсов (направление индуктированной эл.-дв. силы в одном направлении принимаем за положительное, в противоположном направлении —

за отрицательное). Графически изменение величины индуктированной в витке эл.-дв. силы *e* при вращении этого витка около некоторой оси между полюсами может быть представлено в виде кривой — синусоиды (см. фиг. 5). Полный период изменения этой кривой соответствует изменению значения величины эл.-дв. силы *e* в одном витке двухполюсной машины за один полный оборот его около своей оси. Иначе, синусоидальное изменение величины эл.-дв. силы и тока может быть представлено в виде некоторого вектора, вращающегося в плоскости вокруг неподвижной точки с равномерной скоростью в одном направлении, при чем мгновенное значение переменной величины мы получим, проектируя величину вектора на некоторую неподвижную ось, лежащую в той же плоскости. Длина вектора представляет собой максимальное значение переменной величины (эл.-дв. силы или тока).



Фиг. 6.

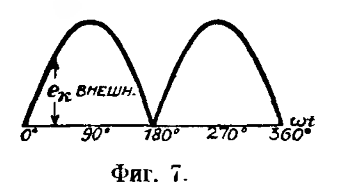
Если концы нашего витка (см. фиг. 6) подвести к одному кольцу, которое разрезать на две половины, при чем так, чтобы один конец витка кончался на одной половине кольца, а другой конец — на другой половине, то при соответствующем расположении щеток на кольце можно добиться того, чтобы ток отводился во внешнюю цепь все время в одном и том же направлении. Нетрудно установить на основании рисунка (фиг. 6), что для этого достаточно щетки поставить так, чтобы они переходили через разрезы кольца с одной половины на другую как-раз в тот момент, когда стороны витка проходят через нейтральную ось между полюсами. В этом случае мы имеем внутри машины (в нашем витке) попрежнему переменную величину и направление индуктированной эл.-дв. силы, представляемую фиг. 5.

Что же касается внешней цепи, то в таковую напряжение и ток отводяться теперь все время в одном направлении, хотя и при переменной величине напряжения и тока, как это изображено графически на фиг. 7.

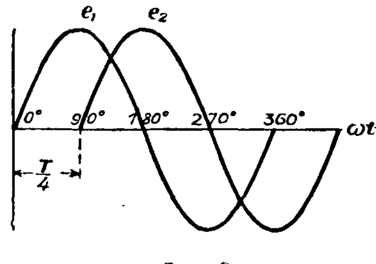
Это разрезанное пополам кольцо носит название коллектора или коммутатора, отдельные части кольца (половины в нашем случае) называются коллекторными пластинами.

Если на барабан якоря машины кроме первого витка, наложить второй виток, расположив его под прямым углом к первому, то, очевидно, и в этом втором витке индуктированная эл.-дв. сила будет изменяться по тому же самому закону, как и эл.-дв. сила, индуктированная в первом витке, т.-е. $e = e_{max} \cdot \sin \omega t$.

Нетрудно видеть, что при расположении двух витков в двух перпендикулярных между собою плоскостях индуктированные в каждом из них эл.-дв. силы будут достигать своих нулевых и максимальных значений не одновременно, а на время, соответствующее повороту якоря на четверть оборота, позднее одна другой, в зависимости от того, какой виток будет проходить нейтральную ось или середину полюсов ранее, чем другой. Как говорят, изменение эл.-дв. силы в одном витке будет отставать по фазе от изменения эл.-дв. силы в другом витке на четверть периода. При графическом изображении кривых эл.-дв. сил это скажется на сдвиге одной кривой по отношению к другой на угол 90° (см. фиг. 8).



Фиг. 7.



Фиг. 8.

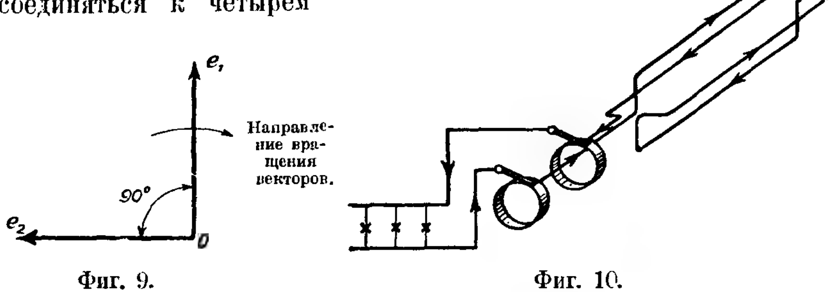
Аналитически то же самое явление сдвига фаз в двух витках может быть представлено следующими выражениями для эл.-дв. сил в 1-м и 2-м витках:

$$\left.\begin{aligned} e_1 &= e_{max} \cdot \sin \omega t \\ e_2 &= e_{max} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (24)$$

При векторном изображении эти две эл.-дв. силы представятся в виде двух векторов, сдвинутых на угол 90 один по отношению к другому (см. фиг. 9).

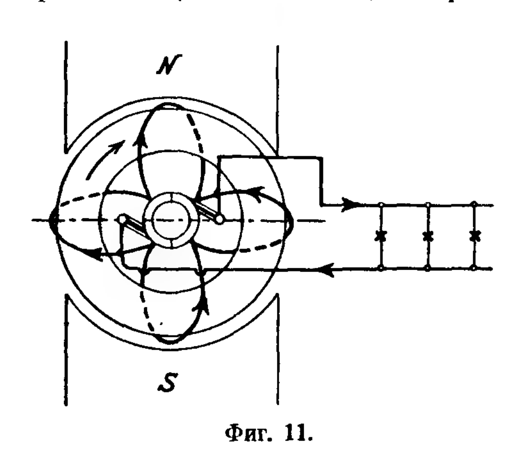
Если эти оба витка (четыре проводника) соединить последовательно (см. фиг. 10), то индуктированные в них эл.-дв. силы будут складываться между собой и, именно, геометрически.

Можно эти же четыре проводника представить себе наложенными на наружную поверхность железного кольца (кольцевого якоря), при чем концы проводников будут присоединяться к четырем



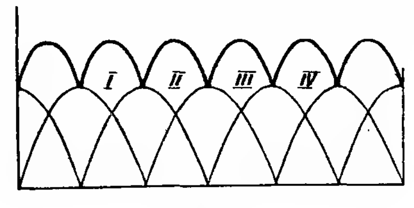
Фиг. 9. Фиг. 10.

коллекторным пластинам, представляющим каждая четвертую часть коллекторного кольца машины переменного тока (см. фиг. 11). Тогда при указанном расположении щеток эл.-дв. силы в двух проводниках, лежащих под северным полюсом, будут складываться между собой. Равным образом будут складываться между собой и эл.-дв. силы, индуктированные в проводниках, лежащих под южным полюсом. Эти две суммарные эл.-дв. силы подводятся параллельно к двум щеткам на коллекторе так, что обе посылают во внешнюю цепь токи в одном направлении, суммирующиеся в щетках. По отношению друг к другу эти две эл.-дв. силы в каждый момент направлены навстречу и вследствие равенства их мгновенных значений взаимно внутри машины уравновешиваются. Нетрудно из чертежа (фиг. 11) видеть, что и здесь во внешнюю цепь ток идет в одном и том же направлении.

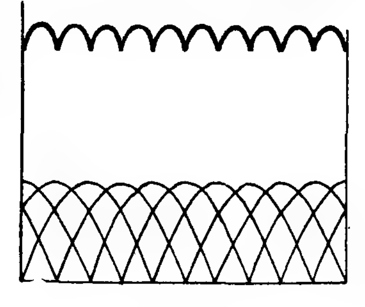


Фиг. 11.

По величине этот ток попрежнему не будет постоянным, но колебания величины его будут менее значительны, чем при одном витке на якоре. Действительно, эл.-дв. силы в каждом из включенных последовательно проводников, проходящих под северным полюсом за один оборот машины, могут быть представлены в виде более тонких кривых на фиг. 12. Более жирной линией на той же фигуре показана суммарная эл.-дв. сила, складывающаяся в каждый момент из эл.-дв. сил двух проводников и подводящаяся к щеткам машины. Суммарная эл.-дв. сила в витках, находящихся под другим полюсом, представляется такой же величиной, но имеет противоположное направление и подводится параллельно с первой эл.-дв. силой к тем же щеткам машины.



Фиг. 12.

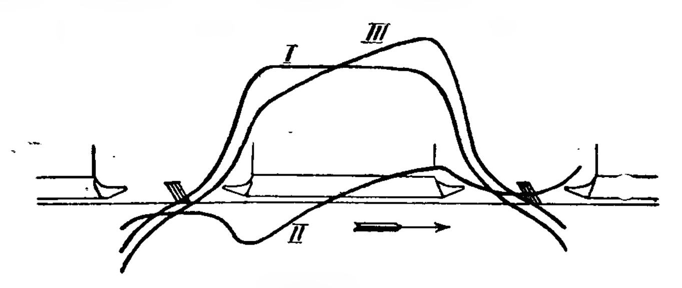


Фиг. 13.

Если увеличить вдвое число проводников на якоре, соответственно увеличив число коллекторных пластин и расположив добавочные проводники по середине в промежутках между прежними проводниками, то легко видеть, что эл.-дв. силы, индуктирующиеся в новых проводниках, будут отставать или упреждать по фазе на соответствующий угол эл.-дв. силы в соседних, ранее уложенных проводниках. Эл.-дв. силы во всех проводниках, лежащих под северным полюсом, попрежнему будут складываться между собой, и в проводниках, лежащих под другим полюсом,— между собой. Легко определить суммарную эл.-дв. силу машины и в этом случае (см. фиг. 13). Изменения величины эл.-дв. силы машины здесь получаются еще меньшими, чем в предыдущем случае.

Таким образом, увеличивая число проводников обмотки якоря и число коллекторных пластин, можно довести колебание величины эл.-дв. силы машины до величины, практически незаметной. Путем графического построения или аналитическим расчетом можно определить, что при увеличении числа коллекторных пла-

стин выше 16 колебания становятся меньшими одного процента от максимального значения суммарной эл.-дв. силы машины. Практика показывает, что такие колебания не отзываются уже заметным образом на колебании силы света ламп накаливания.

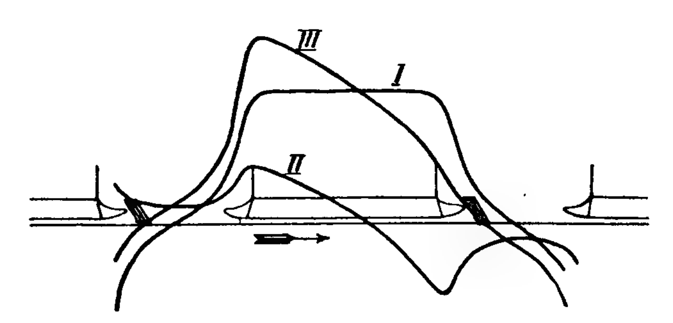


Фиг. 14.

Распределение магнитной индукции нагруженного генератора под полюсом.

I — Кривая поля магнитов; II — кривая поля якоря; III — результирующая кривая поля генератора.

Таким образом у генераторов постоянного тока, предназначенных для освещения, необходимо число коллекторных пластин делать не менее 16. Чем больше число коллекторных пластин, тем эл. дв. сила машины будет ровнее по величине.



Фиг. 15.

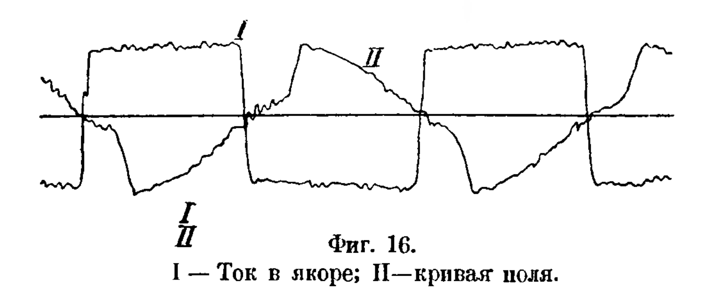
Распределение магнитной индукции нагруженного двигателя под полюсом.

I — Кривая поля магнитов; II—кривая поля якоря; III— результирующая кривая поля двигателя.

Выше, при выводе выражения для эл.-дв. силы, индуктируемой в каждом отдельном проводнике обмотки, мы предполагали распределение магнитного поля между полюсами равномерным. В действительности это распределение магнитного поля далеко не равномерно и имеет разную форму, меняясь, как увидим далее,

при переходе от холостого хода машины к нагрузке. Обычные формы кривой поля показаны на фиг. 14, 15 и 16, при чем последняя кривая дает экспериментально (при помощи осциллографа) снятую форму поля.

Ординаты на кривых показывают значения магнитной индукции в разных точках по окружности якоря под полюсом. Так как в общее выражение эл.-дв. силы машины входит значение полного магнитного потока, выходящего из одного полюса, то величина эл.-дв. силы машины от неравномерности распределения магнитного поля не изменится, пока не меняется значение общей величины магнитного потока. Что же касается мгновенных значений



Фиг. 16.
I — Ток в якоре; II—кривая поля.

эл.-дв. силы, индуктирующейся в каждом из проводников обмотки, то они будут меняться как по величине, так и по направлению, соответственно изменению величины магнитной индукции B по окружности якоря.

$$e = B \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad (25)$$

Для синусоидального распределения магнитной индукции вдоль окружности якоря значение магнитной индукции в разных точках окружност может быть представлено следующим выражением:

$$B = B_{max} \cdot \sin \omega t; \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad (26)$$

здесь ωt — электрический угол между нейтральной осью, где значение магнитной индукции равно нулю, и радиусом от центра к точке окружности якоря, где определяется значение магнитной индукции и эл.-дв. силы в проводнике. В этом только случае и для мгновенных значений эл.-дв. силы в проводнике получится изменение также по закону синуса.

Напомним, что при исчислении в электрических градусах смещению по окружности якоря под одним полюсом от одной

2*

нейтрали до другой соответствует всегда угол в 180° эл. градусов и смещению на два полюса соответствует угол в 360° эл. градусов, между тем как при измерении в обыкновенных угловых единицах, геометрических градусах, смещению по окружности якоря на два полюса будет соответствовать 360° геом. градусов только при двухполюсной машине. При машине четырехполюсной смещению на два полюса соответствует угол в 180° геом. градусов, а при восьмиполюсной машине — в 90° геом. градусов. Вообще говоря:

$$\alpha^{\circ}_{эл\ гр} = p\alpha'^{\circ} \text{ геом. град.}, \quad (27)$$

или

$$\alpha'^{\circ}_{геом\ гр} = \frac{\alpha^{\circ}_{эл\ гр}}{p}, \quad (28)$$

где p — число пар полюсов в машине. На основании приведенного выше выражения для B при синусоидальном распределении поля получим значение для индуктированной в проводнике эл.-дв. силы в зависимости от изменения значения магнитной индукции по окружности якоря в следующем виде:

$$e = B_{max} v \cdot l \cdot 10^{-8} \sin \omega t, \quad (29)$$

или, при постоянной скорости вращения проводника и при постоянных значениях B_{max} и l, имеем:

$$e = e_{max} \cdot \sin \omega t, \quad (30)$$

где $e_{max} = B_{max} v \cdot l \cdot 10^{-8}$ вольт, т.-е. то же выражение, что мы имели при предположении равномерного и прямолинейного распределения магнитных линий между полюсами.

В случае если распределение магнитной индукции под полюсами изменяется по закону какой-нибудь неправильной, но периодической кривой, то, как известно, такую кривую можно разложить на ряд синусоид. Для каждой гармоники синусоиды выражение для индуктированной эл.-дв. силы представится в виде:

$$e_{\nu} = e_{\nu\ max} \cdot \sin (\nu \omega t + \psi_{\nu}), \quad (31)$$

где ν означает порядок той гармонической индукции, для которой определяется эл.-дв. сила. Определенные отсюда гармонические составляющие эл.-дв. силы можно сложить между собой графически и таким образом определить истинное значение индуктированной эл.-дв. силы для положения проводника в каждой точке по окружности якоря.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ.

ЯКОРЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА И ИХ ОБМОТКИ.

1. Деление якорей по форме якорных сердечников.

По форме якорных сердечников различают якоря:

1) дисковые,
2) кольцевые,
3) барабанные.

В настоящее время в нормальных машинах употребляются исключительно барабанные якоря; первые два типа имеют лишь историческое значение.

По расположению на сердечнике обмотки различают: а) гладкие и б) зубчатые якоря.

Современной формой являются лишь зубчатые якоря, у которых обмотка располагается в особых впадинах, идущих по поверхности якоря параллельно оси вала. В сечении, перпендикулярном оси, наружная поверхность такого якоря имеет зубчатую форму, отсюда и название. Впадины зубчатых якорей бывают: а) открытые, б) полузакрытые и в) закрытые. Более употребительны первые два типа впадин вследствие большего удобства устройства в них обмотки.

2. Обмотки якорей. Главные системы обмоток.

Изолированные проводники, образующие якорную обмотку, соединяются между собой таким образом, чтобы эл.-дв. силы, индуктированные в отдельных проводниках, складывались и давали то общее напряжение, или, вернее, ту общую эл.-дв. силу

динамомашины, которую требуется получить от нее. Для отвода во внешнюю сеть тока, создаваемого суммарной эл.-дв. силой, служат щетки, которые накладываются в тех местах коллектора, где кончаются цепи последовательно соединенных между собой проводников, дающих эл.-дв. силу одного и того же направления.

Различают две системы обмоток:

а) замкнутые и

б) разомкнутые.

В настоящее время в электрических машинах постоянного тока употребляются исключительно замкнутые обмотки, в которых все проводники обмотки соединены между собой последовательно таким образом, что, обойдя по обмотке все проводники, приходят к началу ее. В отдельных случаях вся обмотка якоря делится на несколько самостоятельных обмоток, элементы которых перемежаются между собой в известной последовательности по поверхности якоря (многократно замкнутые обмотки).

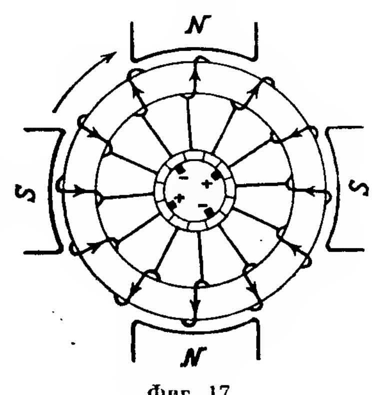
С механической стороны якорь представляется в виде железного остова с симметрично расположенными на нем, обычно совершенно одинаковыми, элементами обмотки, которые образуют замкнутую цепь.

Со стороны эл.-дв. сил, индуктирующихся в отдельных элементах обмотки, и со стороны токов, обтекающих эти элементы, каждую обмотку можно подразделить на отдельные параллельные цепи. Каждая параллельная цепь образуется из последовательно соединенных между собой проводников, индуктированные эл.-дв. силы которых имеют одинаковое направление, при чем совокупность эл.-дв. сил этих проводников образует результирующую эл.-дв. силу динамомашины. Отдельные параллельные цепи соединяются (по отношению к внешней сети) между собой параллельно таким образом, что одни концы их кончаются в тех местах коллектора, где наложены щетки, отводящие ток во внешнюю сеть (положительные щетки), другие (концы параллельных ветвей обмотки) кончаются под щетками другой полярности (отрицательными), через которые ток возвращается в якорь из внешней сети.

В процессе работы машины (при ее вращении) в каждый последующий момент разные проводники (разные элементы) образуют отдельные параллельные цепи. Таким образом при вращении машины один какой-нибудь проводник будет после-

довательно входить то в одну, то в другую, то в третью и т. д. параллельную цепь.

В каждый данный момент отдельную параллельную цепь образует группа проводников, включенных между двумя последовательно расположенными разноименными щетками. Наименьшее число параллельных цепей, как мы увидим далее, при современных системах обмоток — две.



Фиг. 17.

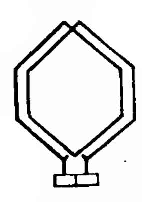
Простейшую, так называемую спиральную, обмотку имеют кольцевые якоря (см. фиг. 17). Эта обмотка составляется из ряда в виде спирали намотанных на железный кольцеобразный остов-якорь витков проволоки. По обходе всего кольца конец спирали присоединяется к началу так, что получается вполне замкнутая цепь.

Более сложными получаются обмотки при барабанных якорях. Такие обмотки имеются двух типов: петлевые (или параллельные) и волновые. Последние бывают последовательными и последовательно-параллельными в зависимости от числа параллельных цепей в этих обмотках.

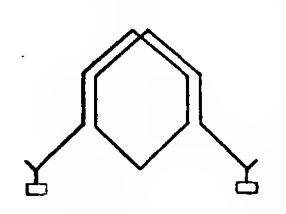
В силу конструктивных условий при барабанных якорях приходится для того, чтобы эл.-дв. силы в последовательно включенных проводниках складывались, соединять проводник, лежащий под одним полюсом, со следующим проводником, лежащим под соседним полюсом другой полярности. Если затем устроить соединение с проводником, лежащим под первым же полюсом (устроить петлю, см. фиг. 20 и 22), то получится петлевая обмотка. Если дальнейшее соединение будет сделано с каким-нибудь проводником, лежащим под следующим (третьим) полюсом, то получится волновая обмотка (см. фиг. 21 и 23) соответственно форме, получающейся в этом случае из ряда соединенных между собой проводников. Иногда в волновой обмотке, прежде чем продвинуться с обмоткой под третий полюс, делают две или более петли, возвращаясь под первый же полюс (см. фиг. 19).

3. Основные обозначения обмоток.

Элементом обмотки называется часть обмотки, заключающаяся между двумя последовательно расположенными (при прохождении обмотки) коллекторными пластинами (см. фиг. 18 и 19). Очевидно, число элементов обмотки всегда равняется числу коллекторных пластин. Два последовательно соединенных между собой проводника образуют виток. Каждый элемент обмотки состоит из одного или нескольких витков.



Фиг. 18. Элемент петлевой обмотки.



Фиг. 19. Элемент волновой обмотки.

Элемент делится на две активных стороны. Каждую активную сторону образует совокупность проводников, входящих в один элемент и расположенных под одним полюсом. Для того чтобы два последовательных проводника (две стороны одного витка) при вращении машины в каждый данный момент находились под разными полюсами (чтобы эл.-дв. силы, индуктируемые в них, складывались), необходимо расстояние между этими проводниками делать равным примерно одному полюсному делению.

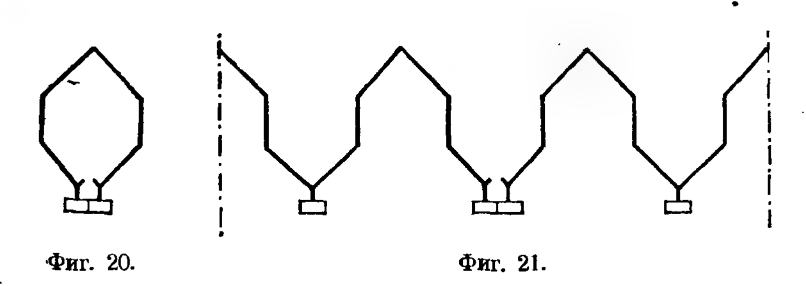
Под полюсным делением мы подразумеваем расстояние (измеренное по длине окружности выточки полюсов), равное длине одного полюса плюс расстояние между двумя соседними полюсами, или, что то же, расстояние между центрами двух соседних полюсов [1]).

Насколько точно два последовательных проводника расположены один от другого на расстоянии одного полюсного деления, настолько точно будет выполнено и требование, чтобы индуктированные в этих проводниках эл.-дв. силы в каждый момент между собой складывались. При точном соблюдении этого расстояния в расположении проводников эл.-дв. силы, индуктированные в них, будут в каждый момент равны между собой. При отступлении от этого расстояния эл.-дв. силы в них обычно различны.

---

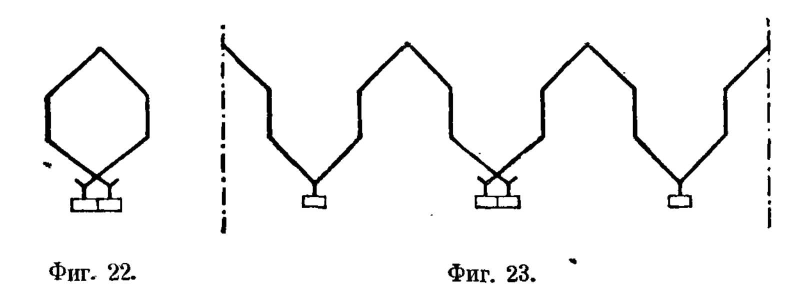
[1]) Говоря об обмотке, необходимо, конечно, определенную только что указанным образом длину полюсного деления привести к длине окружности, по которой расположены проводники обмотки.

Различают перекрещенные и неперекрещенные обмотки. У петлевых обмоток разница между теми и другими видна и на отдельных элементах (см. фиг. 20 и 22), при чем обмотку, изображенную на фиг. 20, обозначают как неперекрещенную, а обмотку фиг. 22, концы которой перекрещиваются между собой, обозначают как перекрещенную.



Фиг. 20. Фиг. 21.

При волновых обмотках по отдельному витку еще нельзя узнать, имеем ли мы дело с перекрещенной или неперекрещенной обмоткой. Лишь после обхода *p* катушек машины (имеющей 2 *p* полюсов) можно видеть, перекрещиваются ли между собой концы этой части обмотки (см. фиг. 23) или нет (см. фиг. 21).

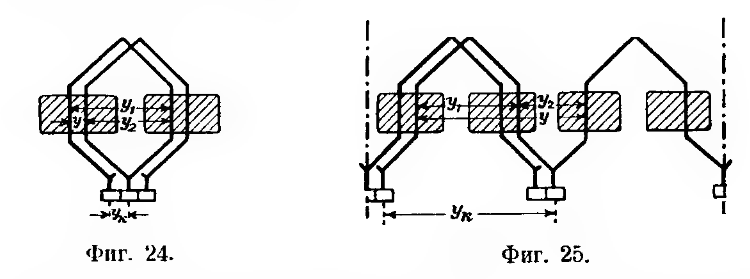


Фиг. 22. Фиг. 23.

Обыкновенно избегают употреблять перекрещенные обмотки, так как они требуют несколько более обмоточного материала. Обмотки, изображенные на фиг. 20 и 23, называют иногда правыми, а обмотки фиг. 21 и 22 — левыми обмотками.

Расстояние по окружности якоря между двумя последовательно соединенными проводниками, образующими виток, обозначают как ширину витка (см. фиг. 24 и 25). В случае, если элемент состоит из одного витка, ширина витка является в то же время и шириной элемента.

Расстояние (также по окружности якоря) между начальными активными сторонами двух последовательных элементов называется шагом, или результирующим шагом обмотки (y — см. фиг. 24 и 25). В случае, если активная сторона состоит из нескольких проводников, предполагаем их слитыми в один проводник, занимающий тот же объем во впадине, что и все проводники этой активной стороны вместе (в действительности при элементе, состоящем из нескольких витков, все витки обычно лежат в одних и тех же впадинах и изолированы вместе, так что образуют общую катушку или секцию, в которую, впрочем, иногда входят еще и другие соседние элементы).



Фиг. 24. Фиг. 25.

Расстояния между начальной и конечной активной сторонами одного и того же элемента (y_1 — см. фиг. 24 и 25) и между конечной активной стороной одного элемента и начальной активной стороной следующего элемента (y_2 на тех же фигурах) называются частичными шагами. Из приведенных примеров ясно, что для петлевой обмотки результирующий шаг равен разности частичных шагов:

$$y = y_1 - y_2, \qquad (32)$$

где y_1 и y_2 всегда положительные величины. Из фиг. 25 волновой обмотки видно, что для этой обмотки результирующий шаг равен сумме частичных шагов:

$$y = y_1 + y_2 \qquad (33)$$

При выполнении обмотки важно знать не абсолютное расстояние в сантиметрах между соединенными проводниками, а относительное расположение их для того, чтобы определить, какой проводник соединить с каким другим проводником или какую активную сторону элемента (катушки) обмотки расположить в какую впадину. Вследствие этого обычно ширину витка, или

шага, обмотки измеряют не единицами длины, а числом пропущенных активных сторон (делений активных сторон) [1]), числом пропущенных коллекторных пластин (делений коллекторных пластин) или, наконец, числом пропущенных зубцов (делений зубцов) при переходе от одной активной стороны до другой.

4. Расположение проводников во впадине.

Обычно во впадине якоря укладывается минимум две активных стороны, относящиеся к двум разным элементам. Эти две активных стороны располагаются одна над другой в два слоя. В силу требования симметрии при исполнении обмотки каждый элемент, состоящий из двух активных сторон, должен иметь одну сторону, лежащую в верхнем слое, и другую, расположенную в нижнем слое. Если рассмотреть примеры обмоток, то можно видеть, что проводники, выходящие из впадины и лежащие в ней в нижнем слое, имеют одно направление, а проводники той же впадины, но лежащие в верхнем слое, при выходе из впадины имеют загиб в другом направлении.

Обычно при симметричной обмотке все проводники, лежащие во впадине в одном слое и принадлежащие иногда к разным элементам, вместе же и в том же порядке (но в другом слое) лежат в другой впадине. В этом случае эти проводники изолируются вместе и образуют так называемую катушку, или секцию.

Секции обычно изгибаются заранее на особых шаблонах вне якоря и только после изолирования укладываются в надлежащие впадины якоря.

В одной впадине укладывается, как мы уже сказали выше, минимум две активных стороны, обычно же больше (всегда четное число из условий симметрии обмотки; см. фиг. 26 и 27). Вне зависимости от числа действительных впадин и зубцов часто делят весь якорь на теоретические „элементарные впадины" и „элементарные зубцы", предполагая, что каждые две лежащие друг над другом активные стороны образуют элементарную впадину. Между такими элементарными впадинами предполагаются расположенными теоретические элементарные зубцы. Часто счет

[1]) Делением активной стороны называется расстояние от центра одной активной стороны до центра рядом лежащей активной стороны. Аналогично этому определяется и величина деления коллекторной пластины.

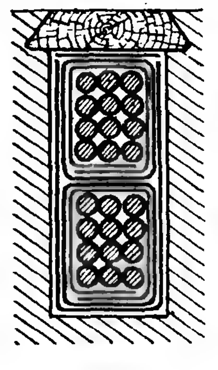
шагов ведется по числу пропущенных теоретических зубцов (делений элементарных впадин). Очевидно, что число элементарных впадин равно числу активных сторон верхнего слоя обмотки (при обычной — двуслойной обмотке). Оно равно также числу элементов или равно числу коллекторных пластин.

5. Шаг по коллектору.

Соответственно шагу по обмотке различают шаг по коллектору, при чем в качестве последнего считают расстояние по окружности коллектора от центра одной коллекторной пластины до центра следующей (по ходу обмотки) пластины (см. фиг. 24 и 25).

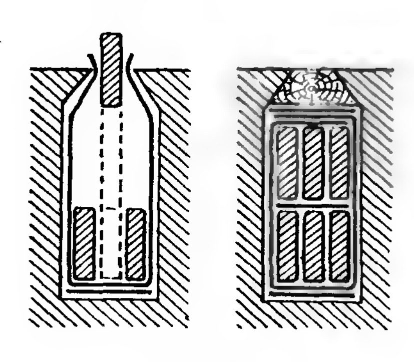
Шаг по коллектору обозначают через y_k.

Измеряют шаг числом пропущенных коллекторных делений.





Фиг. 26.



Фиг. 27.

Коллекторным делением называется расстояние от центра одной коллекторной пластины до центра соседней коллекторной пластины оно равно ширине пластины плюс ширина изоляционного слоя между пластинами.

Так как каждый раз при проходе по обмотке одного элемента мы встречаемся с новой коллекторной пластиной, то, очевидно, число коллекторных пластин K равно числу элементов. С другой стороны, в каждом элементе имеются две активных стороны. Отсюда: полное число активных сторон в обмотке равно двойному числу коллекторных пластин.

$$S = 2K \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (34)$$

Только в спиральной обмотке кольцевого якоря

$$S = K \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (35)$$

6. Способы изображения схем обмоток.

Различают два главных способа схематического изображения обмоток: согласно первому схематически изображают сечение эл. машин в плоскости, перпендикулярной к оси якоря. при чем на это сечение налагают схематическое изображение сечения коллектора, сделанного также перпендикулярно к оси якоря. При таком изображении проводники обмотки якоря попадают на чертеж в виде кружков, а коллекторные пластины в виде отрезков кольца (см. фиг. 28 и 31). Если хотят показать на чертеже направление индуктированной в проводниках эл.-дв. силы или тока, идущего по ним, то эл.-дв. силу или ток, направленные от зрителя за плоскость чертежа, изображают в виде крестика в кружке ⊕ (перо стрелки), а направление эл.-дв. силы или тока из-за плоскости чертежа к зрителю изображается точкой в кружке ⊙ (острие стрелки). Проводники, коротко замкнутые щеткой, изображаются зачерненными кружками ●. Сплошными линиями показывают на чертеже соединения между проводниками и коллекторными пластинами на передней части машины. Соединения на задней стороне показываются пунктирными линиями. Передней стороной считается та, на которой находится коллектор машины, противоположная сторона считается задней.

Другой способ изображения обмотки заключается в том, что всю цилиндрическую поверхность якоря предполагают разрезанной по одной из образующих цилиндра и затем развернутой в одну плоскость, равным образом и коллектор. Тогда все проводники получаются в виде прямых линий, расположенных в том же порядке, как они лежат вдоль якоря. Коллекторные пластины изобразятся соответствующим образом в виде прямоугольных пластин (см. фиг. 29 и 32).

При изображении двуслойной обмотки, в которой все проводники располагаются во впадинах якоря в два слоя, проводники, лежащие в верхнем слое, будем изображать сплошными жирными линиями, а проводники, лежащие в нижнем слое, будем изображать рядом с проводниками, под которыми они лежат во впадинах, проводя их тонкими линиями или пунктиром.

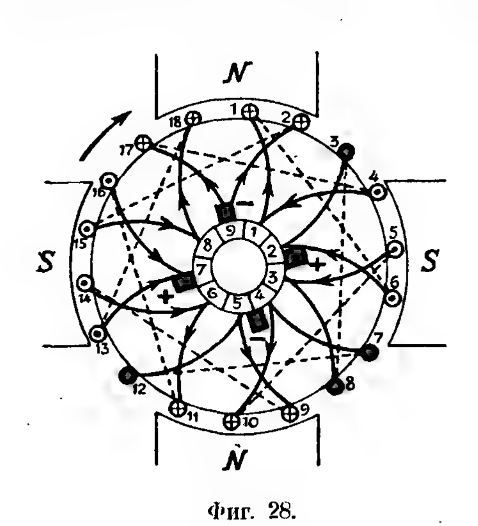
Рассмотрим два простейших примера обмотки: один петлевой и другой волновой, при чем для упрощения возьмем случай, когда каждая активная сторона состоит из одного проводника ($S=N$), где S — число активных сторон, N — число проводников.

Для сравнения обоих типов обмотки в обоих случаях примем одинаковое число полюсов, одинаковое число активных сторон, следовательно, и одинаковое число коллекторных пластин, а также возьмем и одинаковые частичные шаги.

1) Петлевая обмотка (см. фиг. 28—30):

$$S = N = 18; \qquad K = 9;$$
$$2p = 4; \qquad 2a = 4;$$
$$y_1 = 5; \qquad y_2 = 3;$$
$$y = y_1 - y_2 = 5 - 3 = 2;$$
$$y_k = 1.$$

Начав с коллекторной пластины № 1, соединяем ее на передней стороне с проводником № 1. Пройдя по проводнику № 1 на заднюю сторону якоря, мы по задней стороне якоря пропускаем 5 делений проводников и соединяем наш проводник с проводником № 6 ($1 + 5 = 6$). По проводнику № 6 выходим на переднюю сторону машины и идем назад в коллекторную пластину № 2 ($1 + 1 = 2$). Из коллекторной пластины № 2 идем также назад к проводнику № 3 ($6 - 3 = 3$). Выйдя по этому проводнику на заднюю сторону, соединяем проводник № 3 вперед с проводником № 8 ($3 + 5 = 8$). На передней стороне соединяем проводник № 8 с коллекторной пластиной № 3 ($2 + 1 = 3$). Через коллекторную пластину № 3 соединяем на передней стороне проводник № 8 назад с проводником № 5 ($8 - 3 = 5$). На задней стороне опять делаем соединение вперед проводника № 5 с проводником № 10 ($5 + 5 = 10$). Выйдя по этому проводнику на переднюю сторону, продолжаем таким же образом делать соединения до тех пор, пока не замкнем всей обмотки, соединив проводник № 4 с коллекторной пластиной № 1 и через нее с проводником № 1.

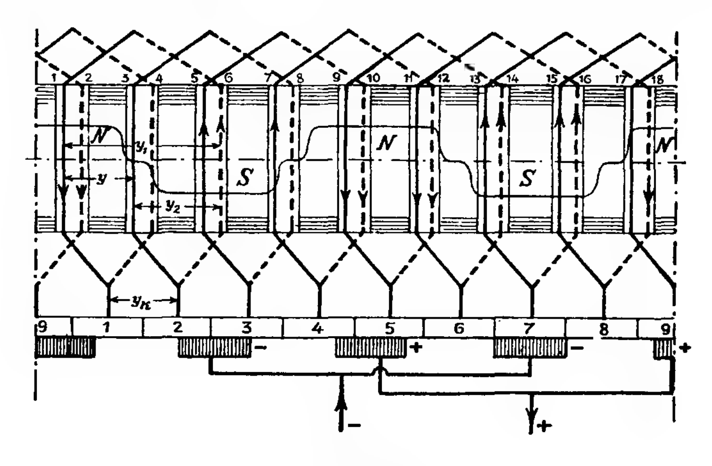


Фиг. 28.

Направление индуктированной в каждом проводнике эл.-дв силы может быть определено по правилу Флемминга.

На чертеже показаны направления эл.-дв. силы в предположении, что якорь вращается по часовой стрелке.

Места расположения щеток находим, исходя из того, что положение щеток должно определять начала и концы отдельных параллельных цепей. В каждой параллельной цепи индуктированные в отдельных проводниках эл.-дв. силы должны между собой складываться. Следовательно везде, где при обходе обмотки будет меняться в проводниках направление индукти-



Фиг. 29.

рованной эл.-дв. силы, будет кончаться одна параллельная цепь и начинаться другая. В этом месте будет находиться одна из щеток.

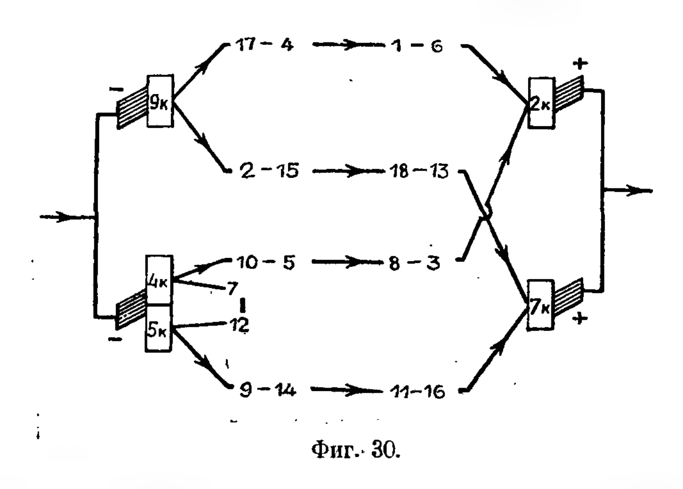
Таким образом в нашем примере мы находим четыре параллельных цепи, четыре точки изменения направления индуктированной эл.-дв. силы и четыре щетки: две положительных, отводящих ток во внешнюю цепь (каждая из двух подходящих к ней параллельных цепей), и две отрицательных, к которым возвращается ток из внешней цепи и через которые ток внутри машины распределяется по отдельным параллельным цепям.

В развернутом виде та же обмотка может быть представлена, как показано на фиг. 29.

Стрелками обозначено направление индуктированных в проводниках эл.-дв. сил.

Разбивку на отдельные параллельные цепи и последовательность соединения элементов можно показать на следующей упрощенной схеме (см. фиг. 30).

Иногда обмотки изображают не в виде схем, а в виде особых таблиц, показывающих последовательность соединений между проводниками. Равным образом составляют особые таблицы для соединений коллекторных пластин. Обычно номера проводников располагают по парам во столько рядов, сколько в обмотке пар параллельных цепей. Каждая пара составляется из двух



Фиг. 30.

проводников, образующих один элемент. Коллекторная таблица имеет стольке же одиночных рядов, сколько обмоточная двойных.

Вышеприведенный пример можно представить в виде следующей таблицы:

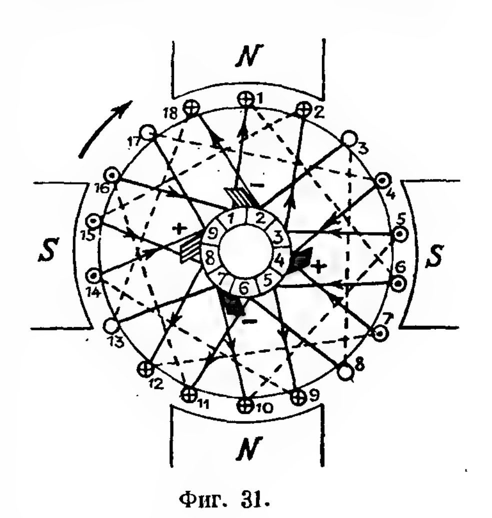
ТАБЛИЦА 1.

Таблица соединений проводников		Таблица соединений коллекторных пластин	
1 — 6	11 — 16	1	6
3 — 8	13 — 18	2	7
5 — 10	15 — 2	3	8
7 — 12	17 — 4	4	9
9 — 14	1	5	1

2) Волновая обмотка (см. фиг. 31—33).

$$S = N = 18;\ K = 9;\ 2p = 4;\ 2a = 2;\ y_1 = 5;\ y_2 = 3;$$
$$y = y_1 + y_2 = 5 + 3 = 8;\ y_k = 4.$$

Начав опять с коллекторной пластины № 1, идем в проводник № 1. Пройдя на заднюю сторону, мы, как и в петлевой обмотке, идем из проводника № 1 в проводник № 6 (1 + 5 = 6). По проводнику № 6 возвращаемся на переднюю сторону якоря и здесь присоединяем проводник № 6 вперед к коллекторной пластине № 5 (1 + 4 = 5). Из коллекторной пластины № 5 идем опять вперед и присоединяемся к проводнику № 9 (6 + 3 = 9). На задней стороне идем также вперед и соединяем проводник № 9 с проводником № 14 (9 + 5 = 14). Затем выходим на переднюю сторону и таким образом продолжаем делать соединения, продвигаясь все время вперед, пока не замкнем обмотки, придя из проводника № 16 в коллекторную пластину № 1, соединенную с проводником № 1.

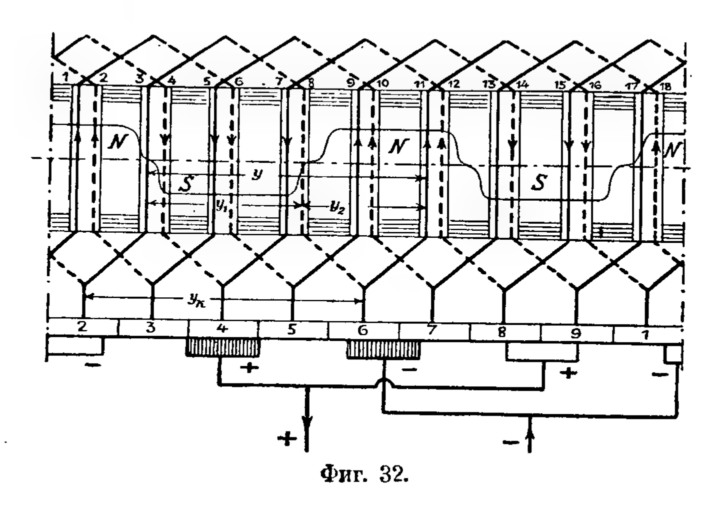


Фиг. 31.

Нанеся на схеме направление индуктированных в проводниках эл.-дв. сил, можно проследить отдельные параллельные цепи и определить положение щеток в местах, где меняется направление индуктированной эл.-дв. силы и начинается новая параллельная цепь. Оказывается, что, несмотря на наличие четырех полюсов в машине, параллельных цепей имеется всего две, и необходимое число щеток также может быть ограничено двумя (на чертеже зачернены). Но возможно также симметрично с главными щетками расположить еще две добавочных щетки (показаны пунктиром), чем несколько разгрузятся от тока главные щетки. Ранее к каждой щетке подходил ток из двух параллельных цепей, теперь же ток из обеих параллельных цепей будет распределяться на две параллельно включенные щетки. Между одноименными щетками (главной и дополнительной)

в этом случае будет включено по элементу, стороны которых находятся около нейтральной зоны и, следовательно, в которых индуктированная эл.-дв. сила минимальна.

В развернутом виде эти обмотки представлены на фиг. 32.



Фиг. 32.

В упрощенном виде последовательность расположения проводников в двух параллельных цепях может быть представлена так, как показано на фиг. 33.

В виде таблиц эта обмотка представится следующим образом:

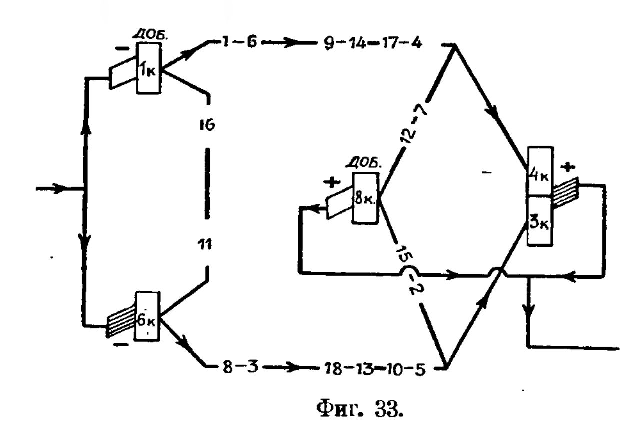
ТАБЛИЦА 2.

Таблица соединений проводников	Таблица соединений коллекторных пластин
1 — 6	1
9 — 14	5
17 — 4	9
7 — 12	4
15 — 2	8
5 — 10	3
13 — 18	7
3 — 8	2
11 — 16	6
1	1

В обоих примерах шаг по коллектору y_k взят численно в два раза меньше, чем результирующий шаг по обмотке:

в примере петлевой обмотки $y=2$, $y_k=1$;

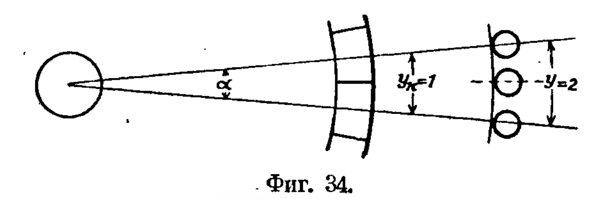
в примере волновой обмотки $y=8$, $y_k=4$.



Фиг. 33.

Это делается в целях симметрии, чтобы получить соединения проводников обмотки с коллекторными пластинами для всех элементов одинаковыми по длине.

Действительно, так как число активных сторон барабанной обмотки всегда в два раза больше числа коллекторных пластин, сдвигу по окружности обмотки на два деления активных сторон



Фиг. 34.

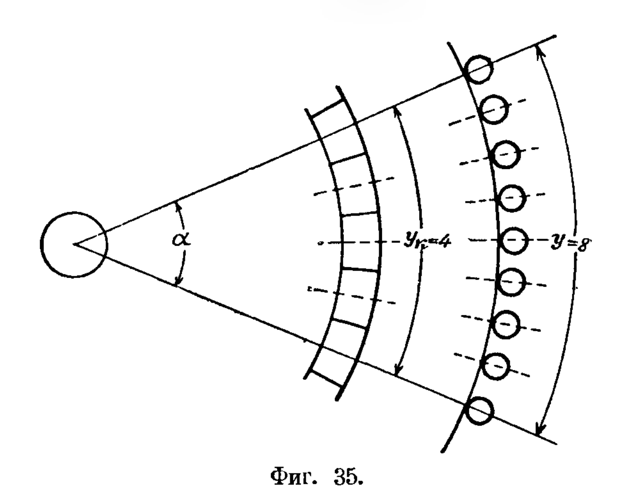
соответствует сдвиг по окружности коллектора на одно деление коллекторной пластины, при чем оба сдвига дадут один и тот же центральный угол α (см. фиг. 34 и 35). Конечно обмотку можно было бы выполнить и при другом соотношении между коллекторным шагом и шагом по обмотке (напр. в последнем примере волновой обмотки для y_k взять значение 5 или 2), но это вызвало бы необходимость делать соединительные провода между проводниками обмотки и коллектором разной длины, а в некоторых случаях и перекрещивание соединительных проводников между

собой *). Таким образом для обоих шагов получается соотношение:

$$y = 2 y_k \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (36)$$

Отсюда непосредственно следует, что y должно быть всегда числом четным.

Так как результирующий шаг равняется или разности двух частичных шагов (петлевая обмотка) или их сумме (волновая обмотка), то для получения y четным частичные шаги должны были бы быть или оба четными или оба нечетными числами. Более подробное рассмотрение показывает, что оба частичных



Фиг. 35.

шага должны быть нечетными числами. Действительно, если бы они были четными числами, мы, начав, напр., с нечетного проводника, соединили бы между собой только нечетные проводники, а четные остались бы несоединенными. При нечетных частичных шагах нечетные проводники при соединении обмотки будут чередоваться с четными, и таким образом все проводники могут быть замкнуты в одну обмотку.

Как было сказано выше, в современных машинах обмотки обычно помещаются на зубчатых якорях во впадинах между зубцами, при чем проводники обыкновенно располагаются в два слоя. На нижеприведенных фиг. 36 и 37 показано для двух рассмотренных примеров расположение проводников в два слоя. Дву-

*) При отступлении от указанного соотношения между шагами по обмотке и по коллектору получаются и большие затруднения в коммутации.

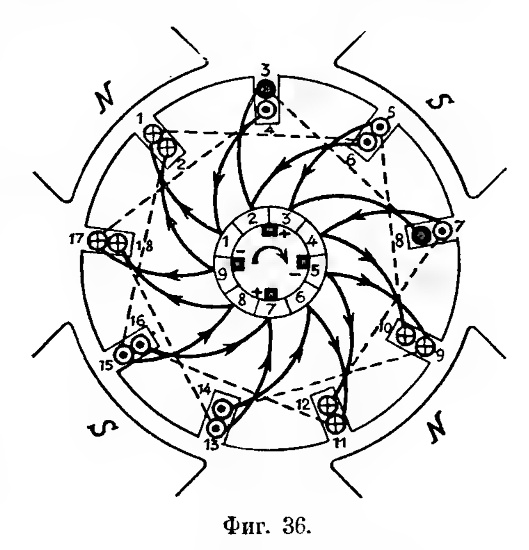
слойное расположение мы получим из однослойного, если представим себе все четные активные стороны сдвинутыми влево и размещенными под соответствующими нечетными активными сторонами. Таким образом активная сторона № 2 расположится под активной стороной № 1, активная сторона № 4 — под активной стороной № 3 и т. д. Частичные и результирующие шаги для такого расположения проводников, при счете по числу пропущенных делений зубцов (в этих примерах элементные впадины совпадают с действительными впадинами), получатся:

1) для петлевой обмотки (фиг. 36):

$$y_{z\,эл_1} = 2; \quad y_{z\,эл_2} = 1;$$
$$y_{z\,эл} = 1;$$

2) для волновой обмотки (фиг. 37):

$$y_{z\,эл_1} = 2; \quad y_{z\,эл_2} = 2;$$
$$y_{z\,эл} = 4.$$



Фиг. 36.

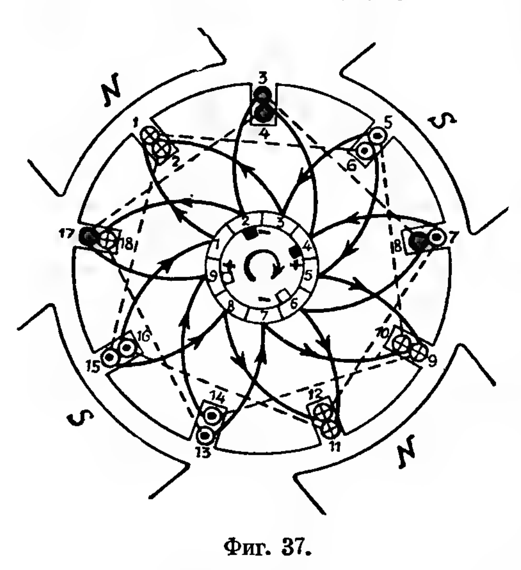
При получившейся нумерации, обычно употребляющейся, все активные стороны, лежащие в верхнем слое, получают нечетные номера, а активные проводники, расположенные в нижнем слое, имеют четные номера. Каждый элемент имеет одну сторону нечетную, лежащую в верхнем слое, и другую, четную, лежащую в нижнем слое, о чем мы говорили уже выше.

7. Сдвиг в магнитном поле. Общие формулы обмотки.

Для того чтобы при обходе обмотки попасть из одной активной стороны элемента в другую активную сторону того же элемента, мы должны сдвинуться по окружности якоря в магнитном поле на величину частичного шага y_1 (равного, примерно, как мы говорили выше, одному полюсному делению). Передвигаясь по обмотке далее, мы должны сдвинуться в магнитном поле назад или вперед на величину второго частичного шага y_2 в зависимости от того, имеем ли мы петлевую или волновую обмотку. По обходе одного элемента получим результирующий сдвиг в ма-

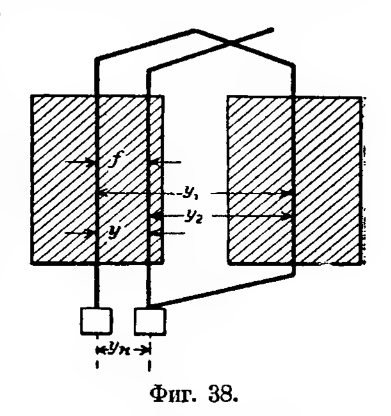
гнитном поле, равный для петлевой обмотки $y = y_1 - y_2$ и для волновой равный $y = y_1 + y_2$.

Так как кривые магнитных полей нормально имеют под всеми полюсами одну и ту же форму, меняясь только по знаку в зависимости от того, находятся ли они под северным или южным полюсом, то при рассмотрении значений эл.-дв. сил, индуктирующихся в двух активных сторонах одного элемента, а также и в последовательно соединяемых между собой целых элементах, обычно является интересным знать не полное смещение от проводника к проводнику, а относительное смещение одной и другой активной стороны или одного и другого элемента по отношению к какой-либо точке (напр. точке нулевого или максимального значения магнитной индукции) кривой магнитного поля вне зависимости от того, находятся ли активные стороны под одним полюсом или под разными.



Фиг. 37.

При таком рассмотрении под сдвигом в магнитном поле и подразумевают относительное смещение активной стороны или элемента по отношению к кривой распределения магнитной индукции под полюсом, вне зависимости от того, под какими полюсами находятся отдельные активные стороны и элементы. Таким образом для сдвига в магнитном поле одного элемента по отношению к предыдущему $\pm f$ мы получим величину, обозначенную на нижеприведенных рисунках (фиг. 38 и 39) указанной буквой ($\pm f$). Знак $+$ в петлевой обмотке относится к непере-



Фиг. 38.

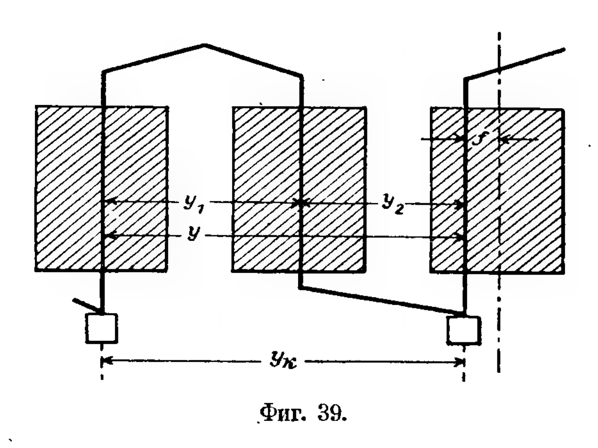
крещенной (правой) обмотке и знак — к перекрещенной (левой) обмотке, при чем для этой обмотки

$$\pm f = y \,, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (37)$$

Для волновой обмотки знак — для неперекрещенной (левой) обмотки и + для перекрещенной (правой) обмотки и

$$\pm f = 2\tau - y, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (38)$$

где τ есть полюсное деление.



Фиг. 39.

Если в машине S активных сторон и $2p$ полюсов, то очевидно

$$\tau = \frac{S}{2p}, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (39)$$

и

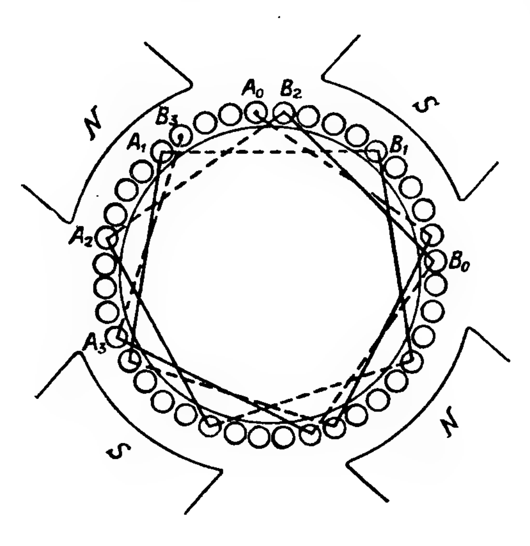
$$2\tau = \frac{S}{p}; \quad \ldots \ldots \ldots \quad (40)$$

отсюда выражение для f при волновой обмотке получает вид:

$$\pm f = \frac{S}{p} - y \quad \ldots \ldots \ldots \quad (41)$$

Если теперь рассмотреть, как в общем случае воспроизводится волновая обмотка, то увидим (см. фиг. 40), что, начав с некоторого проводника A_0, лежащего под одним полюсом, например где-нибудь около нейтрали, мы с каждым частичным шагом будем продвигаться приблизительно на одно полюсное деление,

попадая последовательно под каждый из следующих полюсов, и наконец снова попадем под первый же полюс. Мы говорим, что будем сдвигаться приблизительно на одно полюсное деление, так как никогда результирующий шаг не может точно равняться двойному полюсному делению, ибо в этом случае, обойдя одну первую окружность, мы пришли бы снова в начальный проводник и таким образом замкнули бы в обмотку только незначительную часть проводников. Для того чтобы можно было соединить в обмотку все активные стороны, необходимо, чтобы результирующий шаг был или несколько меньше двойного полюсного деления (неперекрещенная левая обмотка) или несколько более двойного полюсного деления (перекрещенная правая обмотка).



Фиг. 40.

В первом случае, обойдя первый незамкнутый полигон, мы попадаем под первый же полюс несколько левее начальной точки A_0 в проводник A_1 (см. фиг. 40), при чем между этими двумя проводниками A_0 и A_1 будет лежать несколько делений проводников. Сделав второй обход по окружности якоря (обойдя второй полигон из $2p$ сторон, т.-е. пройдя еще p элементов), мы снова попадаем под первый полюс в точку A_2, сдвинутую опять влево относительно точки A_1 на столько же делений проводников, сколько было пропущено между проводниками A_0 и A_1. Продолжая обходить следующие полигоны, мы концами их A_3, A_4 и т. д. будем сдвигаться все влево, при чем легко заметить, что, сдвинувшись в магнитном поле концами полигонов на целое полюсное деление, мы перейдем уже под другой полюс, и направление индуктированной в проводниках эл.-дв. силы изменится на обратное, что будет соответствовать началу новой параллельной цепи. Одновременно с этим в силу того, что ре-

зультирующий шаг обмотки несколько короче двойного полюсного деления (в нашем примере), а следовательно, каждый частичный шаг несколько меньше или равен одному полюсному делению, конец стороны первого полигона новой параллельной цепи обязательно попадает в один из проводников, лежащих между проводниками A_0 и A_1,—между началом и концом первого незамкнутого полигона обмотки (в проводник B_3 в нашем схематическом примере). До этого момента концы первых сторон полигонов, точки B_0, B_1 и т. д., располагались всегда вправо от начальной точки первого полигона A_0. Продолжая обмотку далее, легко можно установить, что со сдвигом концов полигонов A_n, A_{n+1} и т. д. еще на одно полюсное деление влево мы переходим опять под следующий новый полюс, направление индуктированной в проводниках эл.-дв. силы снова изменится на обратное и, следовательно, отсюда начнется новая, третья, параллельная цепь, причем одновременно с этим при первом же обходе якоря новой параллельной цепью мы опять обязательно (в силу равномерности распределения проводников по окружности якоря и одинаковости шагов) попадем в один из свободных проводников между началом и концом первого незамкнутого полигона обмотки (между проводниками A_0, и A_1). Так будет продолжаться, пока мы не обойдем все параллельные цепи, соединив все проводники обмотки. Параллельных цепей будет столько, сколько осталось свободных делений проводников между началом и концом первого незамкнутого полигона, между точками A_0 и A_1, так как каждая новая параллельная цепь хотя бы одним проводником попадает между указанными проводниками, и притом только одним; все остальные проводники, кроме этого одного, лежат вне промежутка A_0 A_1. Отсюда получается правило для определения числа параллельных цепей в волновой обмотке, которое повторим еще раз:

Число параллельных цепей в волновой обмотке $2a$ равняется числу делений активных сторон, лежащих между началом и концом первого незамкнутого полигона обмотки.

Так как сдвигу на два деления активных сторон по обмотке соответствует сдвиг на одно деление по коллектору и шаг по коллектору в два раза меньше шага по обмотке, то легко установить, что, пройдя первый незамкнутый полигон обмотки, считая по коллектору, мы получим между началом и концом этого

полигона в два раза меньшее число свободных коллекторных делений, т.-е. a — число, равное числу пар параллельных цепей.

Если бы мы взяли результирующий шаг несколько больше двойного полюсного деления (перекрещенная обмотка), то, пройдя первый полигон, мы пришли бы к проводнику A_1, лежащему не влево, а несколько вправо от начального проводника A_0 и с обходом каждого нового полигона стали бы сдвигаться все вправо. Сдвинувшись вправо на одно полюсное деление, мы начнем также новую параллельную цепь, которая опять одним проводником пройдет обязательно между началом и концом первого полигона. Таким образом высказанное выше правило определения числа параллельных цепей вполне применимо и в этом случае.

На основании этого правила можно вывести выражение для полного числа активных сторон в волновой обмотке. Действительно, в первом незамкнутом полигоне число всех сторон равно $2p$ — числу полюсов машины, что соответствует p элементам. Так как сдвигу на один элемент соответствует число пропущенных активных сторон y, то, пройдя все p элементов, мы сдвинемся на $p \cdot y$ делений активных сторон. Если к этому числу добавить или из него вычесть (для перекрещенной обмотки) $2a$ делений, то мы получим полное число активных сторон обмотки, так как обойдем полную окружность якоря. Отсюда

$$S = p \cdot y \pm 2a, \quad \dots\dots\dots (42)$$

где знак $+$ относится к неперекрещенной и $-$ к перекрещенной обмоткам.

На основании этого выражения, при заданных: числе активных сторон, числе полюсов и числе параллельных цепей можно определить и результирующий шаг обмотки

$$y = \frac{S \pm 2a}{p}, \quad \dots\dots\dots (43)$$

при чем надо помнить, что y должно быть числом целым и притом четным. Следовательно волновая обмотка выполнима не при всяком числе проводников при заданном количестве полюсов и параллельных цепей.

Частичные шаги находят, деля результирующий шаг приблизительно пополам, но так, чтобы эти шаги обязательно полу-

чились нечетными. Как мы видим, при этом приближенно результирующий шаг получается равным двум полюсным делениям, а каждый из частичных — одному полюсному делению, что требовалось на основании изложенного выше.

На основании того же правила об определении числа параллельных цепей, но в применении к коллектору, можно получить аналогичными рассуждениями выражение для полного числа коллекторных пластин K, именно:

$$K = p \cdot y_k \pm a, \qquad (44)$$

откуда

$$y_k = \frac{K \pm a}{p} \qquad (45)$$

Так как K в два раза менее S, то, сравнивая выражения для y и y_k, мы найдем, что

$$y = 2y_k, \qquad (46)$$

что было определено нами и ранее.

Если обратиться теперь к петлевым обмоткам, то здесь после обхода каждого элемента мы возвращаемся обратно под начальный же полюс, при чем с началом нового элемента мы каждый раз несколько сдвигаемся в магнитном поле (на величину $\pm f = y$) вправо (для неперекрещенной обмотки) или влево (для перекрещенной обмотки). Здесь также сдвиг начальной активной стороны после прохода ряда элементов на целое полюсное деление означает переход под другой полюс, а вместе с тем изменение направления индуктированной в элементах эл.-дв. силы, т.-е. начало новой параллельной цепи.

Как видно из приведенного выше примера, в петлевой (простой, однократно замкнутой) обмотке после одного обхода с обмоткой по окружности якоря мы попадаем в начальный проводник и таким образом замыкаем обмотку. Общий сдвиг в магнитном поле при этом, очевидно, равен полному числу активных сторон S, расположенных на якоре. Отсюда можно определить и число параллельных цепей в петлевой обмотке. Раз полный сдвиг в магнитом поле при обходе обмотки равен S активным сторонам, а сдвигу на одно полюсное деление, т.-е. на $S/2p$ активных сторон соответствует каждый раз начало новой параллельной

цепи, то общее число параллельных цепей при петлевой обмотке будет равно:

$$2a = \frac{S}{2p} = 2p, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (47)$$

т.-е. в петлевой (однократно замкнутой) обмотке число параллельных цепей всегда равняется числу полюсов. В простейших (однократно замкнутых) петлевых обмотках шаг по коллектору делают минимальным, равным $= 1$, т.-е. в этих обмотках, обойдя один элемент обмотки, попадают каждый раз в соседнюю с предъидущей коллекторную пластинку. Так как сдвигу по коллектору на одно деление соответствует сдвиг на два деления активных сторон по обмотке (при сдвиге на один и тот же центральный угол), то результирующий шаг по обмотке берем равным двум делениям активных сторон, оставляя свободное место между двумя начальными активными сторонами соседних элементов для укладки второй активной стороны одного из элементов, начальная активная сторона которого лежит под смежным полюсом. При этом, как видим, удовлетворяется требование, установленное нами выше, чтобы результирующий шаг по обмотке был числом четным, а также и второе требование, чтобы, в целях симметрии соединений обмотки с коллектором, результирующий шаг обмотки был в два раза больше шага по коллектору.

Частичные шаги петлевой обмотки устанавливаем, исходя из того, что расстояние между двумя соединяемыми последовательно проводниками при барабанной обмотке должно быть, примерно, равно полюсному делению (см. выше). Отсюда

$$y_1 \cong \tau \cong \frac{S}{2p} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (48)$$

И так как частичный шаг должен быть целым нечетным числом, то в общем случае можно написать:

$$y_1 = \frac{S \pm b}{2p}, \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (49)$$

где b есть некоторое малое число, которое мы подбираем так, чтобы для y_1 получилось целое и нечетное значение. Когда $b = 0$, т.-е. $y_1 = S/2p$ совершенно точно, мы получаем так называемую обмотку „по диаметру“, ибо в двухполюсных машинах

в этом случае приходится соединять между собой проводники, лежащие на диаметрально противоположных точках окружности якоря. При b, имеющем некоторое конечное значение, получаем обмотку „по хордам“, или обмотку „с укороченным шагом“. Шаг может быть иногда сильно укорочен, что, конечно, должно вызвать неполное использование индуктированной в проводниках эл.-дв. силы.

Второй частичный шаг определяется из условий:

$$y = y_1 - y_2 = \pm 2, \quad \ldots\ldots\ldots (50)$$

или

$$y_2 = y_1 - y = y_1 \mp 2, \quad \ldots\ldots\ldots (51)$$

т.-е.

$$y_2 = \frac{S \pm b}{2p} \mp 2, \quad \ldots\ldots\ldots (52)$$

где знак $+$ перед двойкой относится к перекрещенным и знак — к неперекрещенным обмоткам.

Таким образом мы видим, что при любом четном числе активных сторон петлевая обмотка возможна. Число активных сторон во всякой обмотке есть число четное в силу установленного выше соотношения между числом активных сторон (S) и числом коллекторных пластин (K), [$S = 2K$].

При обычных зубчатых якорях расчет ведут по числу пропущенных делений элементарных впадин. В силу того, что число элементарных впадин в два раза меньше числа активных сторон S и равно числу коллекторных пластин K, правило определения числа параллельных цепей для зубчатых якорей может быть выражено так: число пар параллельных цепей в волновой обмотке равняется числу делений элементарных впадин, остающихся между началом и концом первого незамкнутого полигона.

Отсюда полное число элементарных впадин $Z_{эл}$ очевидно будет равно:

$$Z_{эл} = p \cdot y_{z\,эл} \pm a, \quad \ldots\ldots\ldots (53)$$

откуда может быть определен и результирующий шаг волновой обмотки, выраженный числом пропущенных делений элементарных впадин:

$$y_{z\,эл} = \frac{Z_{эл} \pm a}{p}, \quad \ldots\ldots\ldots (54)$$

где $+$ относится к перекрещенной обмотке и $-$ к неперекрещенной. Так как $Z_{эл} = K$, то, очевидно, всегда

$$y_{z\,эл} = y_k \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (55)$$

Частичные шаги определяются от деления результирующего шага на две приблизительно равные части. При зубчатых якорях к результирующему шагу, измеренному в делениях элементарных зубцов, уже не предъявляется требования четности, равным образом и частичные шаги могут быть четными и нечетными. Все, конечно,—числа целые. Соотношение между частичными шагами и результирующим шагом для волновой обмотки сохраняет силу и здесь:

$$y_{z\,эл} = y_{z_1\,эл} + y_{z_2\,эл} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (56)$$

Шаги по числу элементарных впадин дают возможность определить, в какую элементарную впадину нужно итти из некоторого проводника для получения правильной замкнутой обмотки. Так как в каждой элементарной впадине лежат две активных стороны, то вопрос, с которой же из них следует соединить наш проводник, решают исходя из того положения, что в каждом элементе, т.-е. в каждых двух соединяемых между собой активных сторонах, одна активная сторона должна лежать в верхнем слое, а другая в нижнем. Таким образом, выходя из верхней активной стороны, соединение ведут в другую впадину к нижней активной стороне, и наоборот.

Исходя из изложенных соображений, можно написать следующие соотношения между шагами, измеренными по числу пропущенных делений активных сторон, и шагами, измеренными по числу пропущенных делений элементарных впадин, при волновой обмотке:

$$y = y_{z\,эл} \cdot 2 = y_k \cdot 2; \quad \ldots \ldots \ldots (57)$$

$$y_1 = y_{z_1\,эл} \cdot 2 \pm 1; \quad \ldots \ldots \ldots (58)$$

$$y_2 = y_{z_2\,эл} \cdot 2 \mp 1; \quad \ldots \ldots \ldots (59)$$

при этом знаки $+$ в выражении для первого частичного шага и $-$ для второго частичного шага относятся к обмоткам, у которых начальные активные стороны элементов расположены в верхнем слое, а вторые стороны в нижнем слое; обратные знаки относятся к противоположному случаю.

При петлевой обмотке, на основании соотношений между числом активных сторон и числом элементарных впадин, легко установить, что

$$y_{z\,эл}=\frac{y}{2}=y_k=\pm 1 \quad \ldots\ldots\ldots (60)$$

Частичные шаги в петлевой обмотке определяются из основного положения барабанных обмоток, что расстояние между двумя соединяемыми проволоками должно примерно равняться полюсному делению τ, т.-е. примерно равно $\frac{Z_{эл}}{2p}$. Отсюда

$$y_{z_1\,эл}\cong\frac{Z_{эл}}{2p}, \quad \ldots\ldots\ldots (61)$$

при чем, если $Z_{эл}/2p$ не целое число, берут ближайшее, обычно меньшее, целое число, которое может быть и четным.

$$y_{z_2\,эл}\cong\frac{Z_{эл}}{2p}\mp 1 \quad \ldots\ldots\ldots (62)$$

Как при исчислении шагов по делениям активных сторон, так и при исчислении по числу делений элементарных впадин при петлевой обмотке результирующий шаг равен разности частичных шагов:

$$y_{z\,эл}=y_{z_1\,эл}-y_{z_2\,эл} \quad \ldots\ldots\ldots (63)$$

Соотношение между формулами шагов для гладких и зубчатых якорей получится следующее:

$$y=y_{z\,эл}\cdot 2=y_k\cdot 2; \quad \ldots\ldots\ldots (64)$$

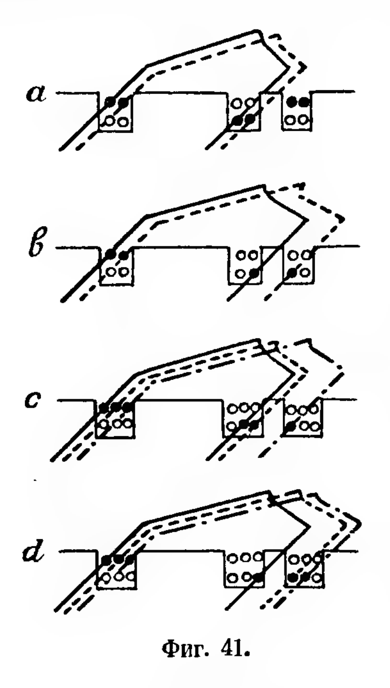
$$y_1=y_{z_1\,эл}\cdot 2\pm 1; \quad \ldots\ldots\ldots (65)$$

$$y_2=y_{z_2\,эл}\cdot 2\pm 1. \quad \ldots\ldots\ldots (66)$$

Знаки $+$ в выражениях для y_1 и y_2 относятся к случаю, когда начальные активные стороны лежат в верхнем слое, а вторые в нижнем, знак $-$ относится к обратному случаю.

Обычно в зубчатых якорях число активных сторон, которое укладывают в одну впадину, бывает более двух, напр. 4, 6 и более. Для выполнения обмоток в таких якорях весьма существенно, особенно при обмотках, выполненных из проволок, бу-

дут ли проводники, лежащие в одном слое какой-нибудь впадины, также вместе итти в другой слой одной из следующих впадин (см. рис. *a* фиг. 41) или же, выйдя из первой впадины, проводники разойдутся по разным впадинам (рис. *b*, *c*, *d* фиг. 41).



Фиг. 41.

Первая „обыкновенная" обмотка имеет преимущество перед вторыми (так называемыми „ступенчатыми") в том отношении, что позволяет произвести предварительно изгибание проводников на особых шаблонах и совместное изолирование для всех проводников одного слоя впадины и затем закладывание во впадины (в этом случае открытые) якоря уже в виде готовых катушек, или секций, что ускоряет и удешевляет изготовление машины. При стержневой обмотке, когда соединение между отдельными стержнями делается как с передней, так и сзадней стороны, — это обстоятельство уже не играет такой роли.

Если обмотку рассчитывать при таких якорях по числу пропущенных делений действительных зубцов с шагами:

$$y_{z_1} \cong \frac{Z}{2p}, \quad y_{z_2} \cong \frac{Z}{2p}; \quad y_{z\ \text{волн. обм}} \cong \frac{Z}{p},$$

то при „обыкновенных" обмотках получатся для всех первых частичных шагов все шаги одинаковыми между собой, вторые же частичные шаги могут отличаться друг от друга. При „ступенчатых" обмотках как первые шаги могут различаться между собой на одно деление зубца, так и вторые между собой. Все это ясно следует из приведенных ниже примеров.

При расчете по действительным зубцам при „обыкновенных" обмотках получается следующее необходимое соотношение между первыми частичными шагами по зубцам и по активным сторонам:

$$y_1 = y_z u \pm 1, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (67)$$

где u есть число активных сторон во впадине, знак $+$ относится к случаю, когда первые активные стороны лежат в верхнем слое, а — к обратному случаю.

Рассмотрим несколько примеров обмоток.

I. Петлевые обмотки.

(Однократно замкнутые, одноходовые.)

1-й пример: $S = N = 32$, $Z_{эл} = K = 16$, $u = 2$, $2p = 4$, $2a = 4$;

$$y_{z\,эл_1} = \frac{Z_{эл}}{2p} = \frac{16}{4} = 4;$$

$$y_{z\,эл_2} = y_{z\,эл_1} \pm 1 = 4 - 1 = 3;$$

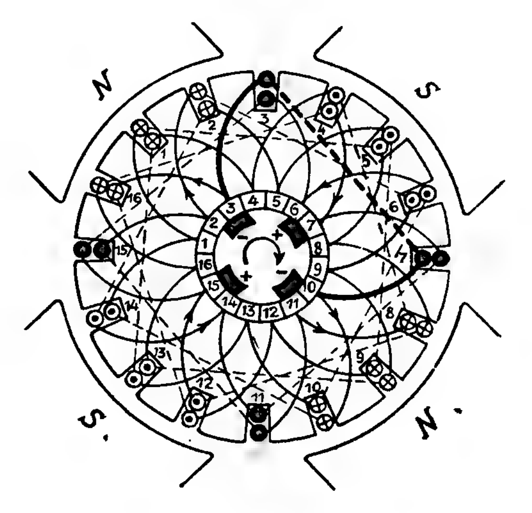
$$y_{z\,эл} = y_{z\,эл_1} - y_{z\,эл_2} = 4 - 3 = 1;$$

$$y_1 = \frac{S \pm b}{2p} = \frac{32 \pm b}{4} = \frac{32 + 4}{4} = 9;$$

$$y_2 = y_1 \pm 2 = 9 - 2 = 7;$$

$$y = y_1 - y_2 = 9 - 7 = 2;$$

$$y_k = 1.$$



Фиг. 42.

или иначе:

$$y_1 = y_{z\,эл_1} \cdot 2 \pm 1 = 4 \cdot 2 + 1 = 9;$$

$$y_2 = y_{z\,эл_2} \cdot 2 \pm 1 = 3 \cdot 2 + 1 = 7;$$

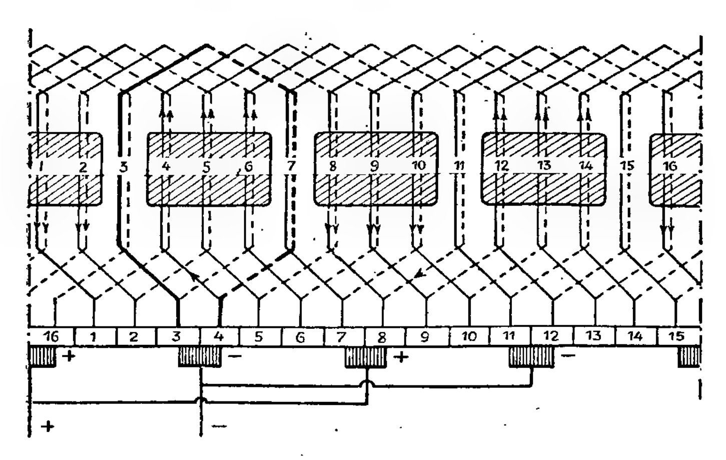
$$y = y_1 - y_2 = y_{z\,эл} \cdot 2 = 1 \cdot 2 = 2;$$

$$y_k = y_{z\,эл} = 1.$$

Обмотка по диаметру, неперекрещенная, правая. Схема, см. фиг. 42 и 43.

2-й пример: $S = N = 36$, $Z_{эл} = K = 18$, $Z = 9$, $u = 4$, $2p = 4$, $2a = 4$;

$$y_{z\,эл_1} \cong \frac{Z_{эл}}{2p} = \frac{18}{4} \cong 4;$$
$$y_{z\,эл_2} = y_{z\,эл_1} \pm 1 = 4 - 1 = 3;$$
$$y_{z\,эл} = y_{z\,эл_1} - y_{z\,эл_2} = 4 - 3 = 1;$$
$$y_k = 1.$$



Фиг. 43.

Обмотка по хордам, неперекрещенная, правая.

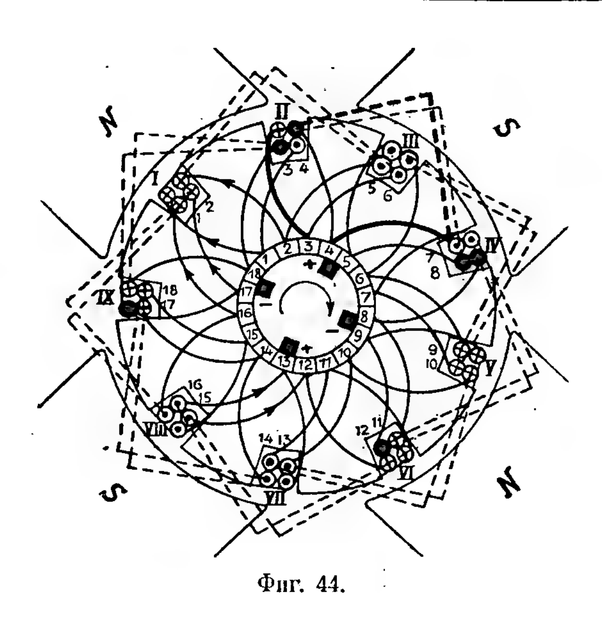
Из расчета по элементарным зубцам:

$$y_1 = y_{z\,эл_1} \cdot 2 \pm 1 = 4 \cdot 2 + 1 = 9;$$
$$y_2 = y_{z\,эл_2} \cdot 2 \pm 1 = 3 \cdot 2 + 1 = 7;$$
$$y = y_1 - y_2 = y_{z\,эл} \cdot 2 = 1 \cdot 2 = 2;$$
$$y_k = y_{z\,эл} = 1.$$

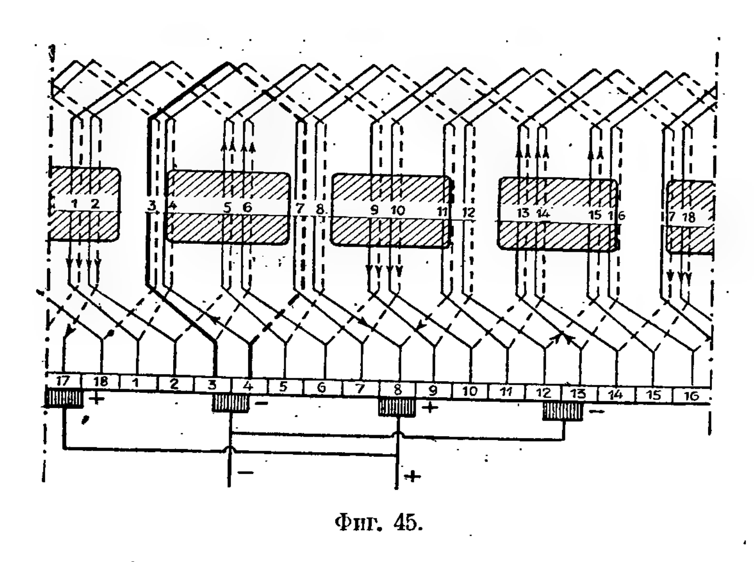
По действительным зубцам:

$$y_{z_1} \cong \frac{Z}{2p} = \frac{9}{4} \cong 2; \qquad y_{z_2} = \text{или } 2 \text{ или } 1;$$
$$y_1 = y_{z_1} \cdot u \pm 1 = 2 \cdot 4 + 1 = 9.$$

Начальные активные стороны лежат в верхнем слое, $\frac{Z_{эл}}{p}$ = нечетному числу. Схемы см. фиг. 44 и 45.



Фиг. 44.



Фиг. 45.

3-й пример.

$$S = N = 72, Z_{эл} = K = 36, u = 4, Z = \frac{72}{4} = 18, \quad 2p = 6, \quad 2a = 6;$$

$$y_{z\,эл_1} \backsimeq \frac{Z_{эл}}{2p} = \frac{36}{6} = 6;$$

$$y_{z\,эл_2} = y_{z\,эл_1} \pm 1 = 6 - 1 = 5;$$

$$y_{z\,эл} = y_{z\,эл_1} - y_{z\,эл_2} = 6 - 5 = 1;$$
$$y_k = y_{z\,эл} = 1;$$
$$y_1 = y_{z\,эл_1} \cdot 2 \pm 1 = 6 \cdot 2 + 1 = 13;$$
$$y_2 = y_{z\,эл_2} \cdot 2 \pm 1 = 5 \cdot 2 + 1 = 11;$$
$$y = y_1 - y_2 = 13 - 11 = 2;$$
$$y_k = 1.$$

По действительным зубцам:

$$y_{z_1} \cong \frac{Z}{2p} = \frac{18}{6} = 3;$$
$$y_{z_1} = \text{или } 3 \text{ или } 2;$$
$$y_1 = y_{z_1} \cdot u \pm 1 = 3 \cdot 4 + 1 = 13, \text{ или иначе:}$$
$$y_1 = \frac{s \pm b}{2p} = \frac{72 + b}{6} = 13, \quad b = 6;$$
$$y_2 = y_1 \pm 2 = 13 - 2 = 11;$$
$$y = y_1 - y_2 = 13 - 11 = 2;$$
$$y_k = 1.$$

Обмотка по диаметру неперекрещенная, „обыкновенная", начальные активные стороны лежат в верхнем слое, $\frac{Z_{эл}}{p}$ = четному числу. Схемы см. фиг. 46 и 47.

II. Обмотки волновые.

(Однократно замкнутые.)

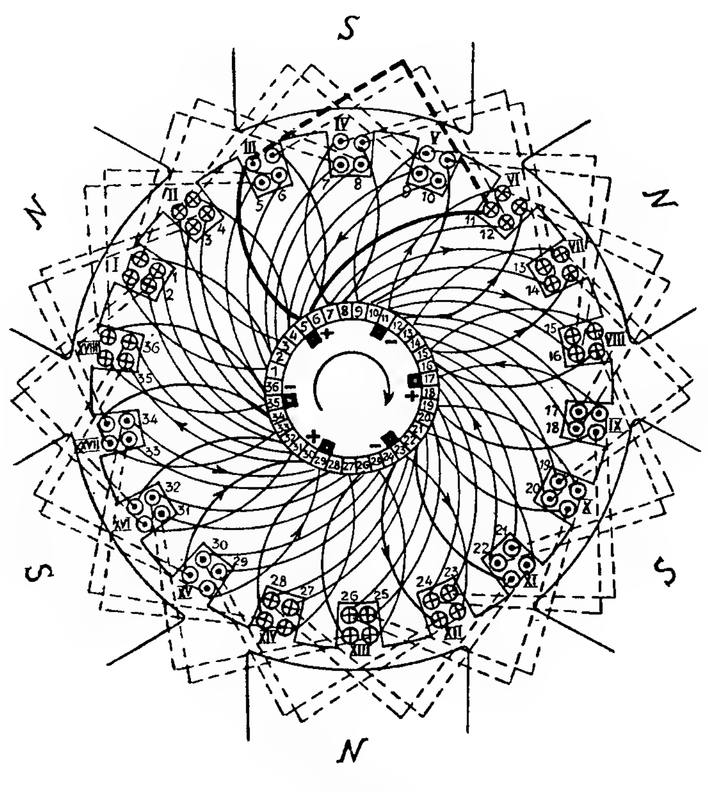
А. **Последовательные** (или, иначе называемые, одноходовые).

1-й пример.

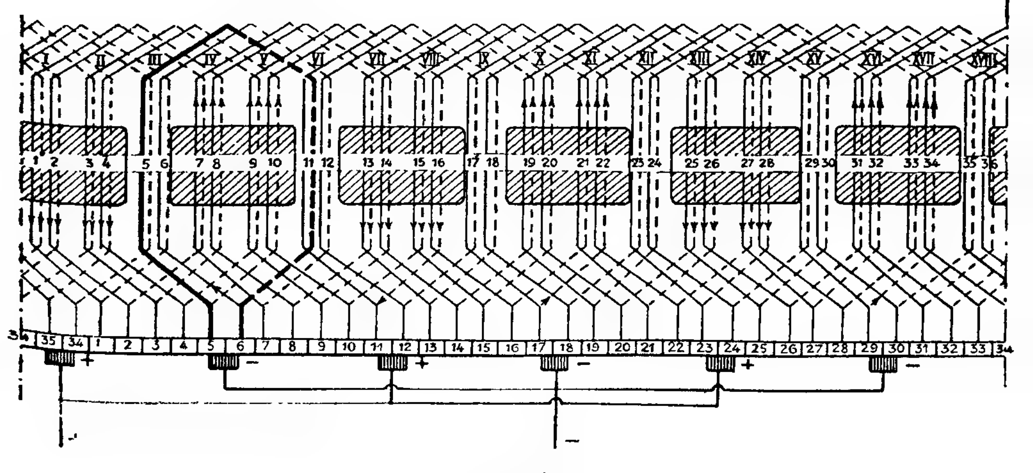
$$S = N = 34, \; Z_{эл} = K = 17, \; u = 2, \; 2p = 4, \; 2a = 2;$$
$$y_{z\,эл} = \frac{Z_{эл} \pm 1}{p} = \frac{17 \pm 1}{2} = 8 \text{ или } 9;$$

а) берем:

$$y_{z\,эл} = y_{z\,эл_1} + y_{z\,эл_2} = 8;$$
$$y_{z\,эл_1} = 4;$$
$$y_{z\,эл_2} = 4;$$
$$y_k = y_{z\,эл} = 8;$$
$$y = y_{z\,эл} \cdot 2 = 8 \cdot 2 = 16;$$
$$y_1 = y_{z\,эл_1} \cdot 2 \pm 1 = 4 \cdot 2 + 1 = 9;$$
$$y_2 = y_{z\,эл_2} \cdot 2 \mp 1 = 4 \cdot 2 - 1 = 7;$$
$$y_k = y_{z\,эл} = 8,$$



Фиг. 46.



Фиг. 47.

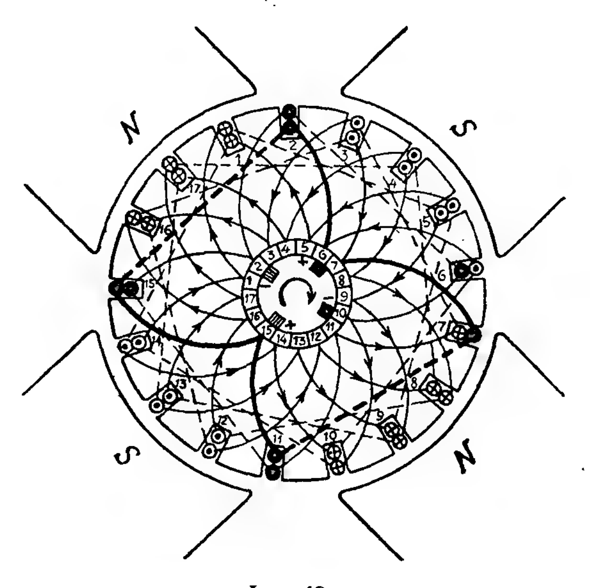
или иначе:

$$y = y_1 + y_2 = \frac{s \pm 2}{p} = \frac{34 - 2}{2} = 16;$$

б) берем: $y_1 = 9$,

$y_2 = 7$,

$$y_k = \frac{y}{2} = \frac{16}{2} = 8.$$



Фиг. 48.

Обмотка неперекрещенная левая, начальные активные стороны лежат в верхнем слое.

Схемы, см. фиг. 48 и 49.

2-й пример.

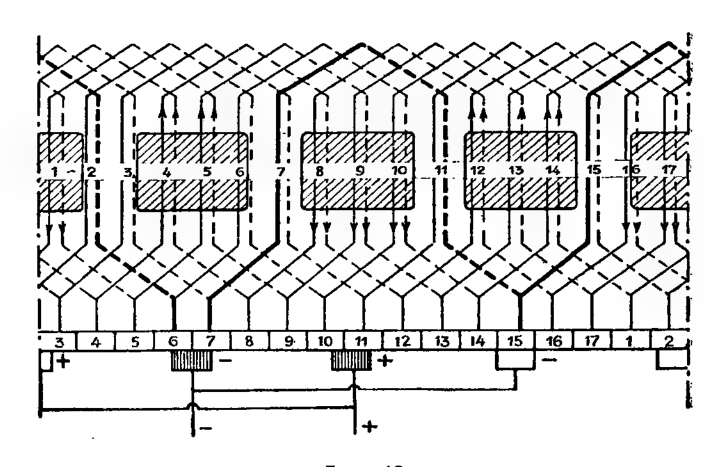
Если бы мы захотели устроить волновую последовательную обмотку для числа проводников, указанного в примере 3-м (петлевые обмотки) при $s = 72$, $2p = 6$ и $2a = 2$, то оказалось бы, что

$y_{z\,эл} = \frac{z_{эл} \pm 1}{p} = \frac{36 \pm 1}{3} \neq$ целому числу, т.-е. при этих условиях волновая последовательная обмотка невозможна.

Берем для следующего примера задание при ближайшем большем числе проводников, при котором $y_{z\,эл} =$ целому числу.

3-й пример.

$$S = N = 76,\ Z_{эл} = K = 38,\ u = 4;$$
$$Z = \frac{S}{u} = \frac{76}{4} = 19;$$
$$2p = 6,\ 2a = 2;$$
$$y_{z\,эл} = y_{z\,эл_1} + y_{z\,эл_2} = \frac{Z_{эл} \pm 1}{p} = \frac{38 \pm 1}{3} = 13;$$



Фиг. 49.

для частичных шагов можно взять:

$$y_{z\,эл_1} = 6 \text{ или } 7;$$
$$y_{z\,эл_2} = 7 \text{ или } 6;$$
$$y_k = y_{z\,эл} = 13.$$

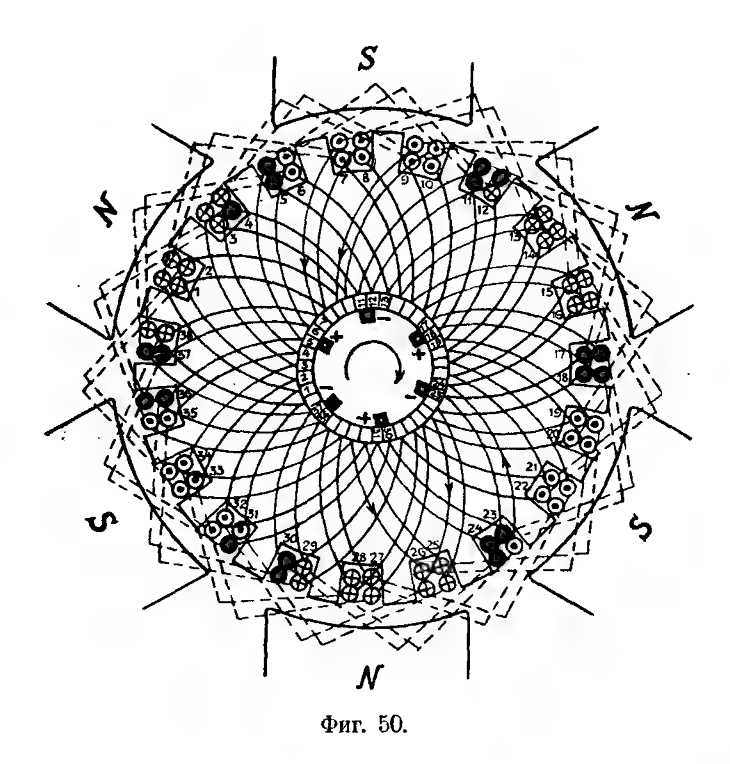
Обмотка перекрещенная, правая.

(Знака —, при котором могла бы получиться неперекрещенная обмотка, в данном случае взять нельзя, так как для $y_{z\,эл}$ получилось бы не целое число.)

$$\frac{Z_{эл} + 1}{p} = \text{нечетн. число.}$$

Спрашивается, какие же значения брать для частичных шагов, первые или вторые, или это безразлично. Если для $u = 2$

не имеет особого значения, будет ли первый частичный шаг взят равным 6, а второй 7, или наоборот, то при $u=4$ или более выбор того или другого значения частичного шага непосредственно скажется на форме катушек: при одном шаге мы получим „обыкновенную“ обмотку с одинаковой длиной задних лобовых соединений [1]), и, следовательно, с возможностью при



Фиг. 50.

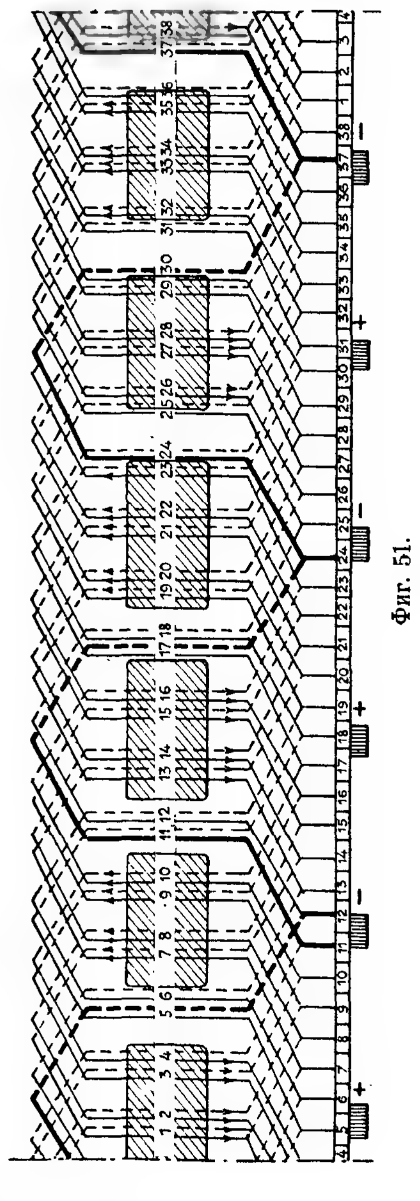
проволочных обмотках предварительного изготовления катушек на шаблонах, при другом шаге мы можем получить „ступенчатую“ обмотку с разными длинами задних лобовых соединений.

Для получения „обыкновенной“ обмотки необходимо, начав с проводника, лежащего, например, в левом крайнем положении верхнего ряда, попасть второй активной стороной того же элемента в левое же крайнее положение нижнего слоя другой впадины. Для этого, очевидно, необходимо, чтобы первый частич-

[1]) Лобовыми соединениями мы называем соединения между отдельными проводниками обмотки на передней и задней сторонах якоря.

ный шаг, выраженный числом пропущенных элементарных впадин, делился на число элементарных впадин, заключающихся в одной действительной впадине,

т.-е. $\frac{y_{z\,эл_1}}{u/2}$ = целому числу. В нашем примере для получения „обыкновенной" обмотки необходимо, чтобы $y_{z\,эл_1}$ делилось на $u/2 = 4/2 = 2$. Таким образом при первых значениях частичных шагов мы получим „обыкновенную" обмотку, при вторых—„ступенчатую". См. схемы фиг. 50 и 51.



Фиг. 51.

Б. Последовательно-параллельные (или так называемые двух-, трех- и вообще многоходовые) волновые обмотки.

1-й пример.

$$S = N = 32,\ Z_{эл} = K = 16,$$
$$u = 2,\ 2p = 4,\ 2a = 4;$$
$$y_{z\,эл} = y_{z\,эл_1} + y_{z\,эл_2} = \frac{Z_{эл} + a}{p} =$$
$$= \frac{16+2}{2} = 7.$$

Можно было бы взять и $y_{z\,эл} =$
$$= \frac{16+2}{2} = 9;$$
тогда получилась бы перекрещенная обмотка.

$$\frac{Z_{эл}}{p} = \text{четному числу.}$$

Можно взять:

$y_{z\,эл_1} = 4$ (или 3);

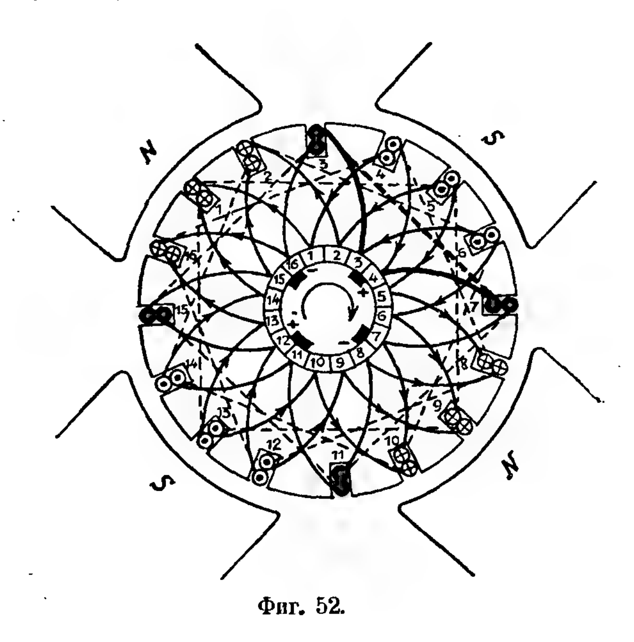
$y_{z\,эл_2} = 3$ (или 4);

$y_k \quad = y_{z\,эл} = 7.$

Обмотка двухходовая, неперекрещенная.

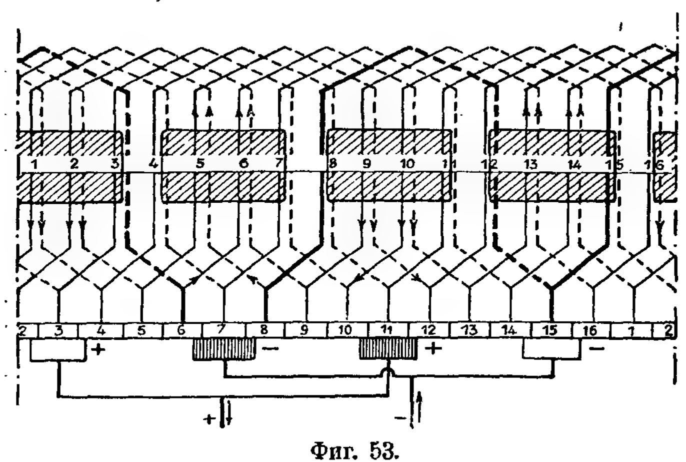
Схемы, см. фиг. 52 и 53 и (упрощенная схема) 54.

На чертеже фиг. 53 показаны две щетки (обязательные к установке) заштрихованные и две незаштрихованные. При ши-



Фиг. 52.

рине первых двух (главных) щеток более ширины одной коллекторной пластины можно обойтись и без установки двух других (вспомогательных) щеток.

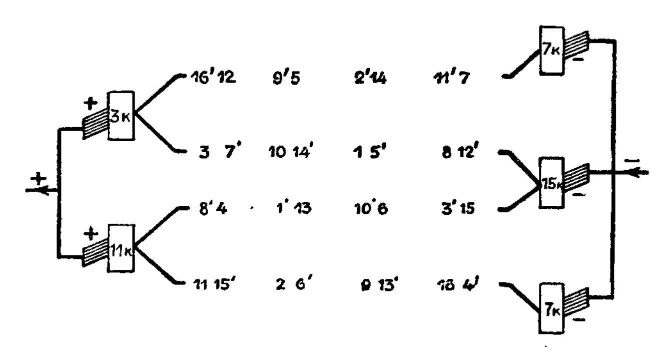


Фиг. 53.

В этом случае через каждую щетку ток отводился бы из 4 параллельных цепей. При установке всех четырех широких

щеток каждая пара одноименных щеток будет соединена между собой короткозамкнутыми витками. Если щетки имеют ширину, равную ширине только одной коллекторной пластины, необходимо устанавливать все четыре щетки [1]).

2-й пример. Если бы мы захотели устроить волновую последовательно-параллельную обмотку для основных заданий



Фиг. 54.

3-го примера петлевых обмоток (см. также пример 2-й волновой последовательной обмотки)

$$S = N = 72, Z_{эл} = K = 36, u = 4, Z = \frac{72}{4} = 18, 2p = 6,$$

то увидели бы, что и эта обмотка будет выполнимой лишь для $2a = 6$, так как для $2a = 4$ $y_{z\,эл}$ опять получится числом дробным.

Для $2a = 6$ имеем (трехходовая обмотка, $a = 3$).

$$y_{z\,эл} = \frac{Z_{эл} \pm a}{p} = \frac{36 \pm 3}{3} = 11 \text{ или } 13.$$

При $y_{z\,эл} = 11$ для частичных шагов можно взять:

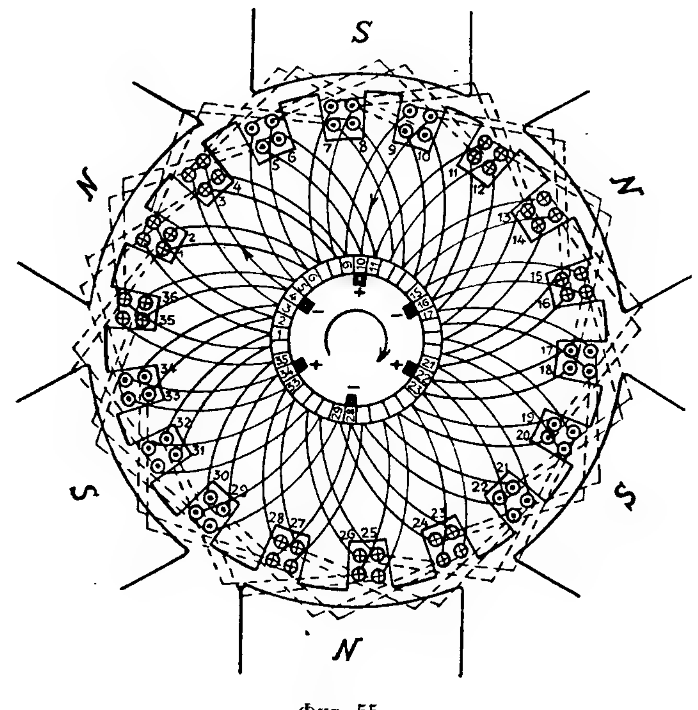
$$y_{z\,эл_1} = 6 \text{ (или 5)};$$
$$y_{z\,эл_2} = 5 \text{ (или 6)};$$
$$y_k \quad = y_{z\,эл} = 11.$$

При первых значениях для $y_{z\,эл_1}$ и $y_{z\,эл_2}$ получится „обыкновенная“ обмотка, при вторых значениях — „ступенчатая“. При

[1]) См. упрощенную схему соединений.

первых значениях возможно также выполнение „обыкновенной“ обмотки и при $u = 6$, т.-е. для $Z = 12$.

В обмотке $Z_{эл}/p$ = четному числу. Минимальное число щеток здесь также две, для чего необходимо ширину щеток сделать более ширины двух коллекторных пластин (см. упрощенную схему, фиг. 58). При ширине щетки, равной ширине одной



Фиг. 55.

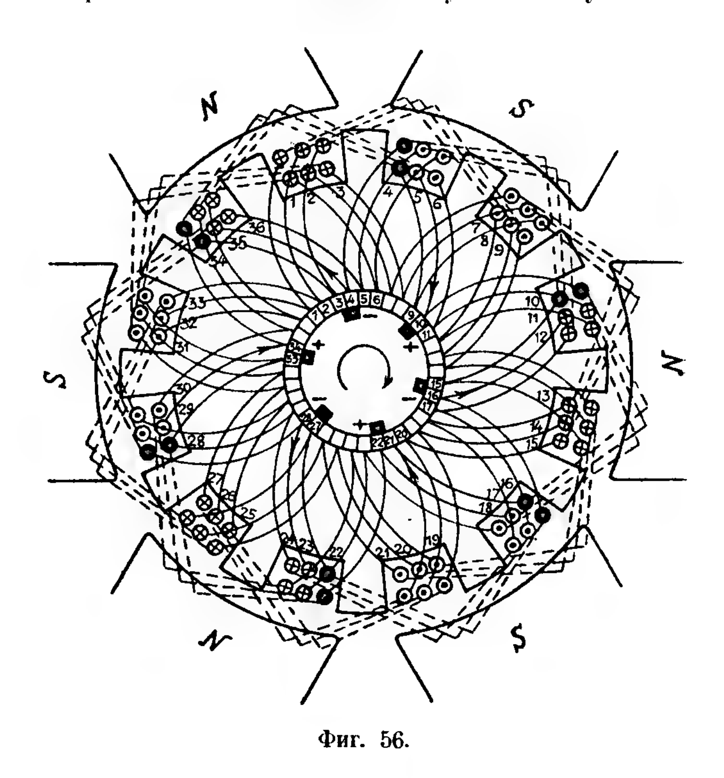
коллекторной пластины, необходимы все шесть щеток. Кроме крайних случаев, даже и при ширине щетки шире одной или двух коллекторных пластин, рекомендуется всегда брать число щеток равным числу полюсов, чем достигается бо́льшая симметричность между отдельными параллельными цепями и кроме того главные щетки разгружаются от слишком большого тока и могут быть сделаны более короткими в направлении оси коллектора. Благодаря последнему обстоятельству и сам коллектор получается более коротким.

Схемы см. фиг. 55, 56, 57 и 58.

8. Многократные и многократно непрерывные обмотки.

А. Многократно непрерывные обмотки.

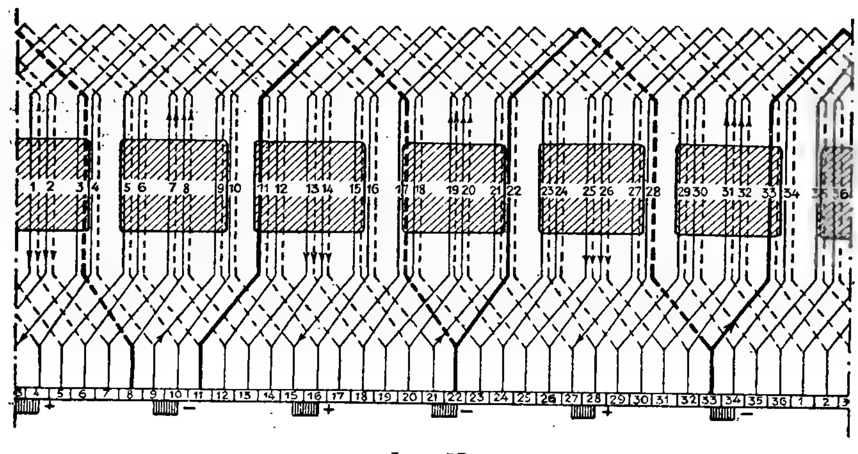
Аналогично тому, что мы видели при двух-, трех- и т. д. ходовых (последовательно-параллельных) волновых обмотках, можно и при петлевых обмотках искусственно увеличить шаг.



Фиг. 56.

В этом случае при последовательном обходе элементов обмотки пропускают между элементарными впадинами, где лежат начальные активные стороны последовательных по ходу обмотки элементов, по одной или по нескольку элементарных впадин. Проводники, лежащие в пропущенных впадинах, соединяются в обмотку лишь при втором, третьем и т. д. обходах обмотки, смотря по тому, сколько оставлено элементарных впадин свободными при первом обходе. Таким образом получается и здесь двух-, трех- и т. д. ходовые петлевые (иначе называемые многократно непрерывными) обмотки. Соответственно оставляемым свободными при первом

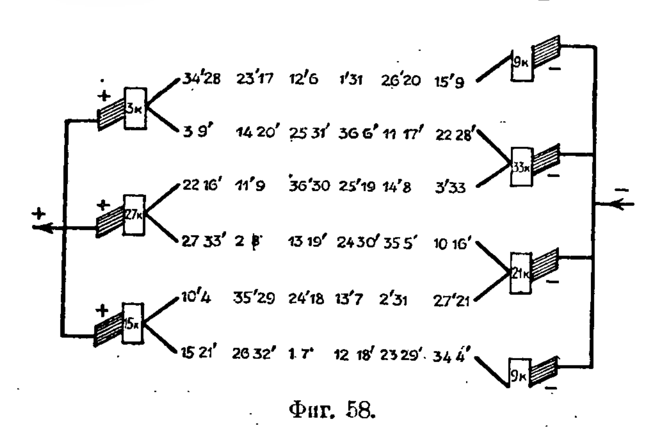
обходе элементарным впадинам также пропускают одинаковое число и коллекторных пластин по коллектору.



Фиг. 57.

Как пример двухходовой (или иначе двукратно непрерывной) однократно замкнутой обмотки можно взять следующую:

$S = N = 34,\ Z_{\text{эл}} = K = 17,\ u = 2,\ 2p = 4,\ 2a = 2ip = 2 \cdot 2 \cdot 2 = 8,$



Фиг. 58.

где число i — показывает, во сколько ходов вокруг якоря мы замыкаем обмотку.

$$y_{z\,\text{эл}_1} \cong \frac{Z_{\text{эл}}}{2p} = \frac{17}{4} \cong 4;$$

$$y_{z\,\text{эл}_2} = y_{z\,\text{эл}_1} \pm i = 4 - 2 = 2;$$

$$y_{z\,\text{эл}} = y_{z\,\text{эл}_1} - y_{z\,\text{эл}_2} = \pm i = 4 - 2 = 2;$$

$$y_k = y_{z\,\text{эл}} = \pm i = 2.$$

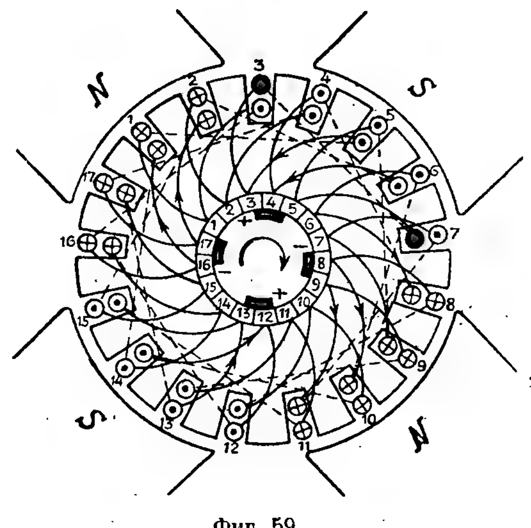
$$y_1 = y_{г\,эл_1} \cdot 2 \pm 1 = 4 \cdot 2 + 1 = 9;$$
$$y_2 = y_{г\,эл_2} \cdot 2 \pm 1 = 2 \cdot 2 + 1 = 5;$$
$$y = y_1 - y_2 = y_{г\,эл} \cdot 2 = 2 \cdot 2 = 4;$$
$$y_к = \frac{y}{2} = 2,$$

или иначе:

$$y_1 = \frac{S \pm b}{2p} = \frac{34 + 2}{4} = 9;$$
$$y_2 = y_1 \pm 2i = 9 - 2 \cdot 2 = 5;$$
$$y = y_1 - y_2 = \pm 2i = 9 - 5 = 4;$$
$$y_к = \frac{y}{2} = \pm i = \frac{4}{2} = 2.$$

Схемы см. фиг. 59 и 60.

Если проследить направление индуктированных в проводниках эл.-дв. сил, то легко видеть, что число параллельных



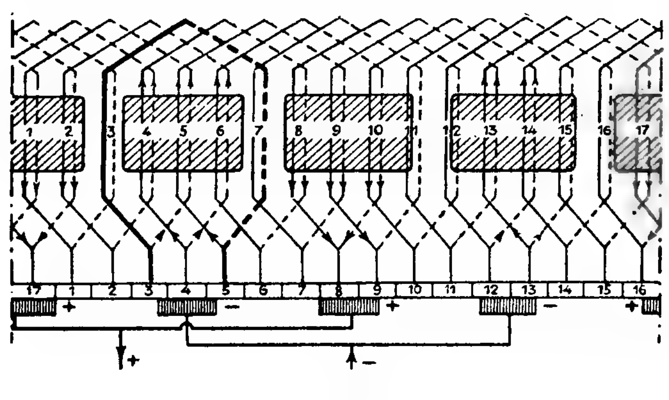
Фиг. 59.

цепей будет 8, т.-е. в два раза более, чем при одноходовой обмотке. Каждый ход имеет попрежнему столько же параллельных цепей, сколько в машине полюсов. Для собирания тока щетки необходимо делать шире, чем ширина коллекторной пластины. К каждой щетке в нашем примере подводится ток из четырех параллельных цепей. Число щеток попрежнему остается равным числу полюсов.

B. Многократно замкнутые обмотки.

В только что приведенном примере мы после одного обхода якоря не попали в начальный проводник и лишь после второго обхода, соединив все проводники, замкнули обмотку, возвратившись в ее начальную точку.

В некоторых обмотках бывает, что, обойдя один раз якорь и соединив только часть проводников, мы возвращаемся к начальному проводнику. В этих случаях, для того чтобы соединить



Фиг. 60.

все проводники, мы должны снова сделать обход обмотки, начав с одного из проводников, пропущенных при первом обходе. При пропуске нескольких элементарных зубцов между двумя соединяемыми начальными активными сторонами двух первых по ходу обмотки элементов иногда приходится несколько раз начинать новые обходы обмотки. В этом случае получаются на якоре несколько самостоятельных обмоток, элементы которых чередуются между собой в правильной последовательности.

То же может случиться и при волновой обмотке.

Обойдя одну или несколько пар параллельных цепей, можно замкнуть обмотку, при чем часть проводников останется не включенной в обмотку. Для того чтобы соединить пропущенные проводники, нужно снова начать обход, начав с одного из пропущенных проводников. Опять получается многократно замкнутая обмотка, состоящая из нескольких самостоятельных обмоток, элементы которых перемежаются между собой.

Посмотрим, при каких условиях получаются многократно-замкнутые обмотки.

Условия многократной замкнутости следующие:

Если число коллекторных пластин K (или, что то же самое, число элементарных впадин $Z_{эл}$) и шаг по коллектору y_k (или равный ему результирующий шаг обмотки $y_{z\,эл}$) имеют общий множитель i, то обмотка i раз замкнута. Если K и y_k числа между собой взаимно простые (или $Z_{эл}$ и $y_{z\,эл}$), то обмотка однократно замкнутая.

Чтобы доказать первое, необходимо показать, что, разбив всю обмотку, состоящую из K элементов, на i групп и обойдя одну группу, начиная с какой-нибудь коллекторной пластины, мы придем к этой же самой коллекторной пластине, т.-е. сделаем один (при петлевой обмотке) или несколько (при волновой обмотке) полных обходов окружности коллектора (а, следовательно, и якоря).

Действительно, при обходе одного элемента мы сдвигаемся по коллектору на y_k делений коллекторных пластин. При обходе группы из K/i элементов мы сдвинемся по коллектору всего на $K/i \cdot y_k$ коллекторных делений. Последнее выражение можно переписать так:

$$\frac{K}{i} \cdot y_k = K \cdot \frac{y_k}{i} = K \cdot c, \quad \dots \dots \quad (68)$$

где $c = y_k/i$ есть некоторое целое число, так как по условию y_k делится нацело на i.

Следовательно действительно при обходе части обмотки мы замкнемся и получим i таких замкнутых обмоток, что и требовалось доказать.

При волновых обмотках многократно замкнутые обмотки могут получиться лишь при числе параллельных цепей $2a > 2$, т.-е. только при последовательно-параллельных обмотках. Покажем, что при последовательной волновой обмотке нельзя создать многократно замкнутую обмотку.

Выше мы видели, что при волновых последовательных обмотках:

$$K = p \cdot y_k \pm 1, \quad \dots \dots \dots \quad (69)$$

откуда

$$K - py_k = \pm 1. \quad \dots \dots \dots \quad (70)$$

Если K и y_k имеют общий множитель i (условие многократности), то можно написать:

$$\left.\begin{array}{l} K = iK' \\ y_k = iy'_k \end{array}\right\}, \text{ где } K' \text{ и } y'_k \text{ — числа целые} \quad . \; . \; . \quad (71)$$

Отсюда

$$K - py_k = i(K' - py'_k) = \pm 1 \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (72)$$

Очевидно, в последнем равенстве левая часть может равняться правой только тогда, когда оба левых множителя i и $(K' - py'_k)$ по отдельности равняются единице, т.-е. $i = 1$, или обмотка может быть только однократно замкнутой.

Таким образом последовательная волновая обмотка, состоящая из одной пары параллельных цепей, является элементарной обмоткой, далее не делимой.

Так как при выводе правила определения числа параллельных цепей при волновой обмотке по числу остающихся делений проводников между началом и концом первого незамкнутого полигона обмотки или определения числа пар параллельных цепей по числу остающихся коллекторных делений между начальной и конечной коллекторными пластинами первого незамкнутого полигона обмотки мы исходили из общего случая (не делая ограничений только на однократно замкнутые обмотки), то, очевидно, и при многократно замкнутых волновых обмотках число параллельных цепей не увеличивается, если не увеличить числа активных сторон между началом и концом первого незамкнутого полигона.

Что касается петлевых обмоток, то здесь при многократности обмоток (будут ли это многократно замкнутые или многократно непрерывные — безразлично) число параллельных цепей увеличичивается в i раз. Действительно, если мы имеем i-кратную обмотку, то общий сдвиг в магнитном поле будет в этом случае $S \cdot i$ делений активных сторон. Так как сдвигу в магнитном поле на $S/2p$ делений активных сторон (на одно полюсное деление) соответствует начало новой параллельной цепи, то общее число параллельных цепей в многократных петлевых обмотках будет:

$$2a = \frac{Si}{S/2p} = i2p, \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (73)$$

т.-е. число параллельных цепей здесь будет в i раз больше, чем при однократно замкнутых обмотках.

Таким образом особое значение имеет многократность при петлевых обмотках, так как позволяет устраивать при том же числе полюсов большее число параллельных цепей. Большее число параллельных цепей уменьшает силу тока i_a, приходящуюся на одну цепь, т.-е. на отдельные проводники обмотки $\left(i_a = \frac{I_{общ.\ ток}}{2a}\right)$, что имеет особое значение при машинах большой мощности или низковольтных.

В волновой обмотке, как мы видели, увеличения числа параллельных цепей путем устройства многократно замкнутой обмотки нельзя получить. Поэтому эти обмотки имеют значение главным образом в тех случаях, когда по расчетным условиям при данной конструкции (числе впадин и их размерах) нельзя получить однократно замкнутой обмотки.

На основании полученного нами ранее выражения для эл.-дв. силы

$$E_a = \frac{p}{a} \cdot N \cdot \Phi \frac{n}{60} 10^{-8} \text{ вольт}$$

мы видим, что при петлевой обмотке связанное с устройством многократных обмоток увеличение числа параллельных цепей вызывает уменьшение эл.-дв. силы машины или требует для поддержания эл.-дв. силы на прежней величине увеличения числа проводников N. При волновых обмотках многократность замкнутости обмотки не связана с увеличением числа параллельных цепей, а потому не будет, при том же значении a, и изменения напряжения.

Примеры многократно замкнутых обмоток.

1. Петлевая, двукратно замкнутая.

$$S = N = 36, \ Z_{эл} = K = 18, \ u = 2, \ 2p = 4, \ 2a = 8;$$

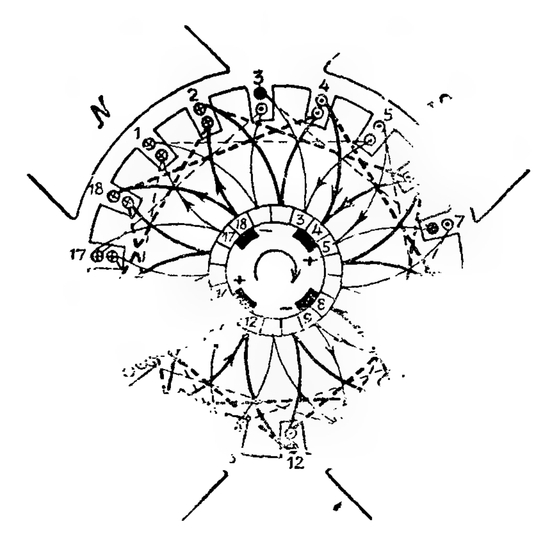
$$y_{z\,эл_1} \cong \frac{Z_{эл}}{2p} = \frac{18}{4} \cong 4;$$

$$y_{z\,эл_2} = y_{z\,эл_1} \pm i = 4 - 2 = 2;$$

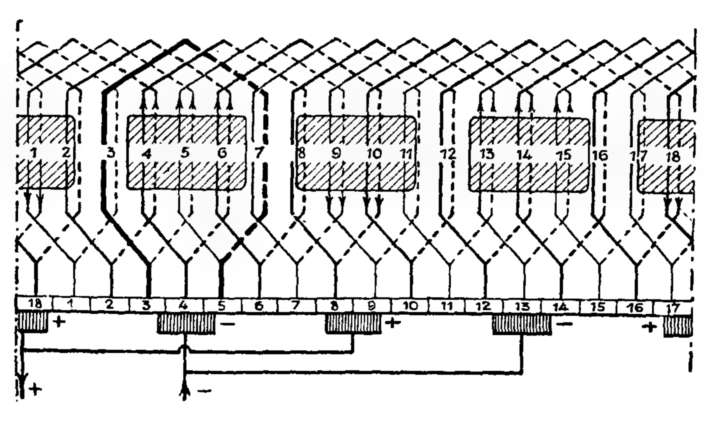
$$y_{z\,эл} = y_{z\,эл_1} - y_{z\,эл_2} = 4 - 2 = 2;$$

$$y_k = y_{z\,эл} = 2.$$

Схемы см. фиг. 61 и 62.



Фиг. 61.



Фиг. 62.

Здесь $y_{z\,эл_1}$ — четное, K/p — нечетное; в каждой отдельной элементарной впадине лежат активные стороны, относящиеся лишь к одной из обмоток.

2. Волновая, двукратно замкнутая.

$$S = N = 64,\ Z_{эл} = K = 32,\ u = 4,\ 2p = 6,\ 2a = 4;$$

$$y_{z\,эл} = \frac{Z_{эл} \pm a}{p} = \frac{32 - 2}{3} = 10.$$

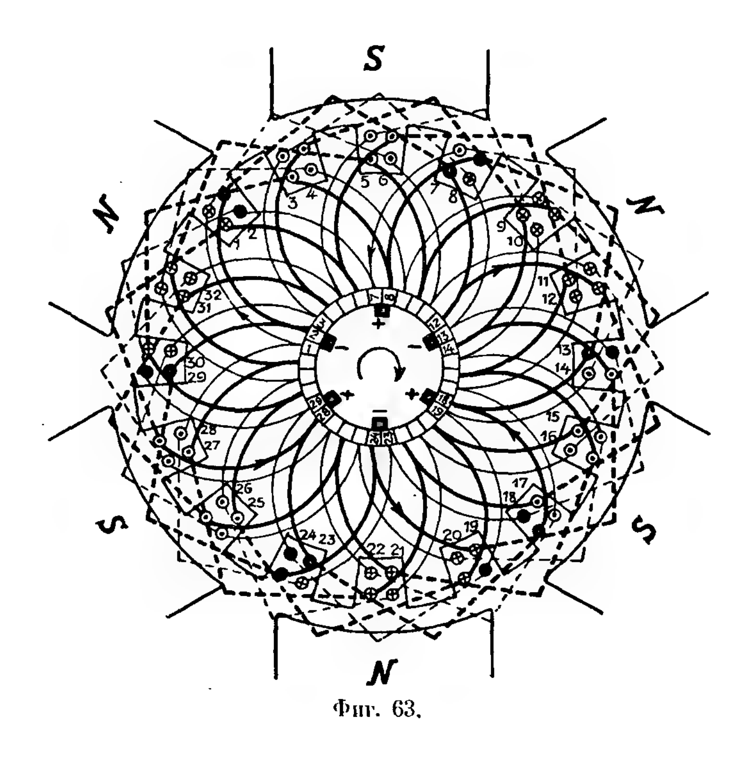
Берем:

$$y_{z\,эл_1} = 5;$$
$$y_{z\,эл_2} = 5;$$
$$y_k = y_{z\,эл} = 10$$

и

$$\left.\begin{array}{l} K = 32 \\ y_k = 10 \end{array}\right\}$$ имеют общий множитель $i = 2$. Обмотка двукратно замкнутая.

Обмотка ступенчатая. Схема, см. фиг. 63 и 64.



Фиг. 63.

Если бы мы взяли

$$y_{z\,эл_2} = 6 \text{ или } 4,$$

то получили бы обмотку обыкновенную, также двукратно замкнутую:

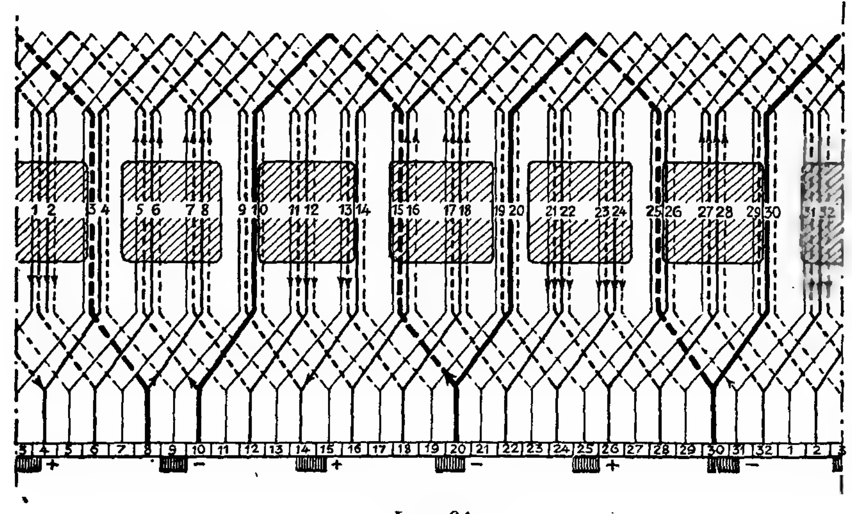
$$y_{z\,эл_1} = 4 \text{ или } 6,$$
$$y_k = y_{z\,эл} = 10.$$

9. Сравнение разных типов обмоток якорей между собой.

Посмотрим, чем характеризуются и чем различаются между собой петлевые и волновые барабанные обмотки.

I. — Петлевые обмотки.

1. Число параллельных цепей тока $2a$ равняется числу полюсов $2p$ в однократно замкнутых обмотках и $i \cdot 2p$ в многократно замкнутых обмотках.



Фиг. 64.

2. Элементы одной параллельной цепи расположены под одной только парой полюсов.

3. Напряжение между двумя рядом лежащими проводниками может быть равно полному напряжению машины (ибо в одной впадине могут находиться проводники, соединенные с коллекторными пластинами, на которые в некоторый момент налегают щетки разных знаков; см. приведенные выше примеры).

II. — Волновые обмотки.

1. Число цепей тока $2a$, вообще говоря, не равно числу полюсов $2p$ $(2a \neq 2p)$. Число пар параллельных цепей равняется числу коллекторных делений, остающихся между началом и концом первого незамкнутого полигона обмотки.

2. Элементы каждой параллельной цепи расположены под всеми полюсами, так что под каждым полюсом находятся

одинаково активные стороны элементов всех параллельных цепей.

3. Напряжение между двумя рядом лежащими проводниками, также как и при петлевой обмотке, может быть равно полному напряжению машины (см. примеры).

В силу изложенных свойств разных обмоток в случае высоковольтной машины часто отдают предпочтение волновым обмоткам, ибо в них при одном и том же числе полюсов и проводников можно легко получить высокое напряжение простым уменьшением числа пар параллельных цепей (см. выражение для

$$E_a = \frac{p}{a} N \cdot \Phi \cdot \frac{n}{60} \cdot 10^{-8} \text{ вольт}).$$

Неравномерность магнитной системы машины, усиление поля под одним полюсом, ослабление под другим, меньше сказывается на равенстве индуктированных эл.-дв. сил в разных параллельных цепях при волновой обмотке, чем при петлевой, ибо в петлевой обмотке элементы одной параллельной цепи находятся под одной парой полюсов, и, следовательно, усиление поля какого-нибудь полюса скажется лишь на части параллельных цепей (именно на двух, лежащих под данным полюсом: одной, элементы которой расположены в одном слое, и другой, элементы которой расположены в другом слое обмотки), равным образом и ослабление одного из полюсов скажется также только на эл.-дв. силе некоторых параллельных цепей; в волновой же обмотке усиление или ослабление одного полюса скажется одинаково на эл.-дв. силе всех параллельных цепей, так как элементы каждой параллельной цепи проходят под каждым полюсом. Большая чувствительность петлевой обмотки несколько компенсируется большим противодействием отдельных параллельных цепей перегрузке током (которая может получиться в них как от неодинаковых эл.-дв. сил, индуктированных в отдельных параллельных цепях, так и от разных сопротивлений этих цепей). Дело в том, что реакция якоря каждой параллельной цепи петлевой обмотки сказывается ослабляющим образом на поле только тех полюсов, под которыми эта параллельная цепь находится. Таким образом при перегрузке током одной параллельной цепи реакция этой параллельной цепи ослабит магнитный поток, пронизывающий ее, а следовательно, уменьшит и эл.-дв. силу в этой цепи. Уменьшение эл.-дв. силы вызовет уменьшение тока

в этой параллельной цепи. Таким образом перегрузка каждой параллельной цепи может дойти только до известной ограниченной величины, при чем перегрузка будет тем меньше, чем сильнее реакция этой части обмотки якоря. Такому ограничению перегрузочного тока в одной параллельной цепи поможет еще падение напряжения в этой цепи от ее омического сопротивления. Способность отдельных параллельных цепей сопротивляться перегрузке их по сравнению с другими параллельными цепями той же обмотки называется свойством саморегулирования обмотки.

Таким свойством саморегулирования в меньшей степени обладает волновая обмотка, так как в ней ограничивает до некоторой степени перегрузку отдельных параллельных цепей лишь омическое падение напряжения; реакция якоря каждой параллельной цепи сказывается одинаковым образом на всех полюсах, равным образом ослабление от реакции якоря каждого полюса одинаково сказывается на эл.-дв. силах во всех параллельных цепях.

При больших мощностях или низких напряжениях, когда получается очень большая сила тока I_a в машине, выгодно ее распределить на большое число параллельных цепей, чтобы ток в каждой цепи i_a не превосходил $\left(i_a = \frac{I_a}{2a}\right)$ определенной величины. Необходимость и пределы ограничения тока в отдельных проводниках и цепях определяются главным образом условиями коммутации.

В целях получения лучшей коммутации (вследствие взаимного успокаивающего действия токов при коротком замыкании) желательно [1]) укладывать большее число проводников в одной впадине (4, 6, 8). В то же время, чтобы положение активных сторон одной впадины во время короткого замыкания в магнитном поле не было слишком различным, рекомендуется брать объем тока одной впадины (сумму токов всех проводников во впадине) не более 900 ампер.

Отсюда получаются следующие пределы для токов в отдельных параллельных цепях:

При 4 проводниках во впадине $i_a \leqslant 225$ А
„ 6 „ „ „ „ $i_a \leqslant 150$ „
„ 8 „ „ „ „ $i_a \leqslant 115$ „

---

[1]) См. Arnold, die Gleichstrommashine. Bd. II.

Только при благоприятных условиях коммутации и двух активных сторонах на впадину можно допустить i_a до 250 ампер и при искусственной коммутации до 500 А и выше. В этих пределах обычно и выбирают ток для параллельных цепей. Проф. Оссанна рекомендует брать ток для $i_a = I_a/2a =$ от 125 до 200 А.

Таким образом при ограниченности допустимой величины тока в отдельных параллельных цепях, при мощных или низковольтных машинах с большим суммарным током, приходится число параллельных цепей брать большим, равным числу полюсов $2p$, а в некоторых случаях даже больше $2p$, переходя к многократным обмоткам. В этих случаях подходящей является обмотка петлевая, в которой мы имеем всегда большое число параллельных цепей (равное $2p$ для однократно замкнутых обмоток и $i\,2p$ для многократных).

Довольно обычен следующий выбор типов обмоток: для машин малой мощности (приблизительно до 50 kW) и 110—220 V напряжения берут последовательную волновую обмотку; для машин средней мощности, особенно высоковольтных (напр. трамвайных генераторов),— волновую последовательно параллельную и, наконец, для машин большой мощности (свыше 600 kW) — петлевую.

10. Условия симметричности обмотки.

Ко всякой замкнутой обмотке должно быть предъявлено требование, чтобы она была симметричной как в электрическом, так и в механическом отношении, т.-е. расположение витков и соединений их с коллектором должно быть таково, чтобы обмотка во всех положениях якоря обладала одинаковыми свойствами по отношению к щеткам. Каждый элемент обмотки, который под щеткой переходит из одной параллельной цепи в другую, должен замещаться другим, по возможности равноценным элементом. Отсюда прежде всего следует, что все элементы должны иметь одинаковое число витков и по возможности одинаковую ширину. Выполнение этого условия достигается устройством обмоток по вышеприведенным формулам.

Далее для полной симметрии было бы необходимо, чтобы в каждой впадине зубчатого якоря было уложено одинаковое число активных сторон, для чего нужно, чтобы полное число активных сторон якоря S делилось на число зубцов якоря Z, т.-е.

$$\frac{S}{Z} = \text{целому числу} \quad \dots\dots\dots \quad (74)$$

При машинах только с двумя параллельными цепями и при некоторых последовательно-параллельвых обмотках выполнение этого условия не всегда необходимо, и от него в этих случаях возможно отступать.

Одними пз главных условий симметрии являются те, которые ставят задачей создать вполне симметричными отдельные параллельные цепи и таким образом получить в них одинаковые эл.-дв. силы.

Из этих условий первым является требование, чтобы число активных сторон в каждой параллельной цепи было одинаковым. Для этого необходимо, чтобы

$$\frac{S}{2a}=\frac{K}{a}=\text{целому числу} \quad \ldots\ldots \quad (75)$$

В силу того, что при вращении якоря включение и выключение из параллельных цепей активных сторон происходит целыми элементами (состоящими из двух активных сторон) при проходе под щетками коллекторных пластин, для полной симметрии было бы правильнее требовать, чтобы

$$\frac{K}{2a}=\text{целому числу}, \quad \ldots\ldots \quad (76)$$

но в силу того, что при $K/2a \neq$ целому числу и $K/a =$ целому нечетному числу лишний элемент включается попеременно то в одну то в другую параллельную цепь из нашей пары, при обычно большом числе элементов, неравномерность в индуктированных эл.-дв. силах отдельных параллельных цепей получается настолько незначительной, что ею можно пренебречь. Это можно сделать тем более, что добавочный элемент состоит из активных сторон, лежащих около нейтральной линии в поле минимальной интенсивности.

Таким образом для симметрии удовлетворяются[1]) требованием, чтобы $K/a =$ целому числу, т.-е. требованием полной симметрии между каждой п а р о й параллельных цепей.

Для того чтобы каждая пара параллельных цепей была совершенно точно равноценна другой при всяком положении якоря, необходимо, чтобы каждой активной стороне одной пары параллельных цепей соответствовала такая же активная сторона, рас-

[1]) См. A r n o l d, l. c.

положенная в одинаковом магнитном поле в каждой из других пар активных сторон. Это возможно только в том случае, если, во-первых, в каждой паре параллельных цепей будет совершенно одинаковое число впадин, т.-е.

$$\frac{Z}{a} = \text{целому числу} \quad \ldots\ldots\ldots (77)$$

и, во-вторых, если также

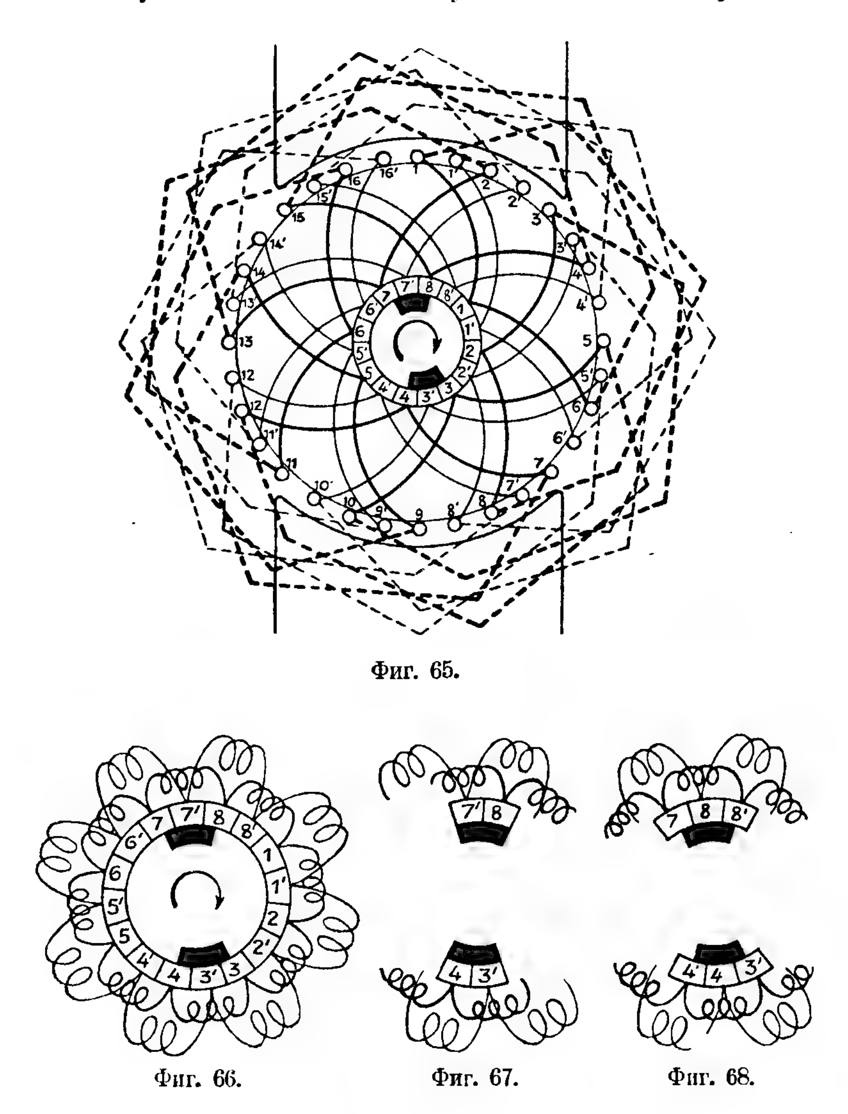
$$\frac{2p}{a} = \text{целому числу} \quad \ldots\ldots\ldots (78)$$

Необходимо, чтобы эти три условия симметрии (K, Z, $2p$ должны нацело делиться на a) были во всяком случае выполнены для каждой симметричной обмотки якоря. На симметрию отдельных параллельных цепей влияет количество щеток, установленных на коллекторе. При петлевых обмотках число щеток всегда равняется числу полюсов. Что же касается волновых обмоток, то, как мы видели из приведенных примеров, при соответствующем выборе ширины щеток (в этом случае рекомендуется брать ширину щетки $b_{щ} = (a+1)\ t_k$, где t_k — ширина коллекторного деления) минимальное число щеток может быть взято $= 2$. Но, как видно из тех же примеров, такое уменьшение числа щеток идет за счет отступления от симметрии. В силу этого, как общее правило, рекомендуется в целях большей симметрии и при волновой обмотке увеличивать число щеток до $2p$.

При многократных (однократно и многократно замкнутых) обмотках всегда будет некоторое отступление от симметрии, при чем в отдельных группах параллельных цепей будет то большее то меньшее число элементов, чем в других группах, с переходом при соблюдении выставленных условий симметрии через моменты равенства. Действительно, для собирания тока из параллельных цепей отдельных обмоток (или „ходов“ обмотки) щетки необходимо делать шире одной, двух и т. д. коллекторных пластин, в зависимости от числа „кратности“ обмотки. При таких условиях, если рассмотреть на упрощенной схеме (см. фиг. 65, 66, 67 и 68) два положения двух параллельных цепей (относящихся к разным „ходам“) двухходовой обмотки по отношению к двум соседним разноименным щеткам, то можно видеть, что

в некоторый момент в одной цепи имеется четное число элементов и в тот же момент другая цепь имеет нечетное число элементов обмотки.

В следующий момент дело будет обстоять наоборот.



Фиг. 65.

Фиг. 66. Фиг. 67. Фиг. 68.

Здесь опять, так как лишний элемент в той или другой параллельной цепи всегда является элементом, находящимся в поле минимальной интенсивности, разница в величине индуктированных в отдельных цепях эл.-дв. сил чрезвычайно незначительна.

В силу большей свободы выбора отдельных частичных шагов при петлевой обмотке эту обмотку легче сделать симметричной. Выполнимой она будет при любом четном числе проводников.

Что касается волновой обмотки, то выполнимой она оказывается лишь при совершенно определенных соотношениях между K, p и a. Симметричной же эту обмотку сделать еще труднее.

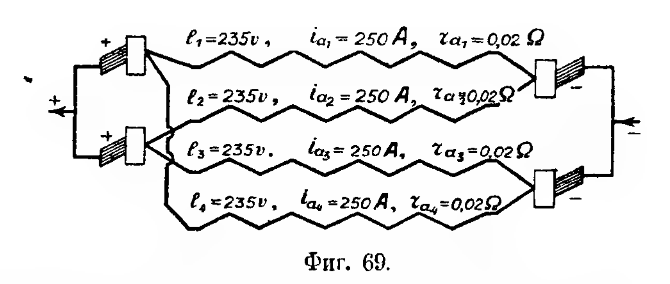
В тех случаях, когда при данном числе проводников, которое должно быть уложено во впадину (определенное u), не удается получить замкнутой обмотки, которая бы соединила все проводники, уложенные во впадинах, часть проводников оставляют несоединенными, как говорят, „мертвыми“.

11. Уравнительные токи при несимметрии обмоток или неравномерности магнитных полей под разными полюсами.

Какое значение имеет симметрия обмоток, симметрия магнитных полей, а следовательно, и равенство индуктированных в отдельных параллельных цепях эл.-дв. сил, лучше всего видно из следующего примера:

Эл.-дв. сила генератора $E_a = 235$ V, $I_a = 1\,000$ A, $2a = 4$, $R_a = 0{,}005\ \Omega$, где R_a есть полное сопротивление обмотки якоря.

Схематически обмотку можно представить в таком виде (см. фиг. 69):



Фиг. 69.

При одинаковой эл.-дв. силе в каждой из параллельных цепей и одинаковом сопротивлении каждой цепи ($r_a = 0{,}005 \cdot 4 = 0{,}02\ \Omega$) сила тока при полной нагрузке $I_a = 1\,000$ A распределится равномерно между всеми 4 параллельными цепями, при чем в каждой цепи ток $i_a = 1\,000/4 = 250$ A. При холостом ходе ток в каждой цепи $i_a = 0$. При холостой работе генератора в якоре (возбуждение независимое) ток $= 0$, и потерь на нагревание не

будет (равны нулю). При полной нагрузке потери на нагревание будут:

$$V_{як_1} = 4 i_a^2 r_a = 4 \cdot 250^2 \cdot 0{,}02 = 5\,000 \text{ ватт в секунду.}$$

Эл.-дв. сила e_a в каждой цепи будет одинаковая и равная общей эл.-дв. силе машины $e_a = E_a = 235$ вольт. При полной и равномерно распределенной по параллельным цепям нагрузке напряжение на зажимах машины будет равно (если эл.-дв. силу поддержать постоянной и равной 235 V):

$$E_k = E_a - I_a R_a, \text{ или} = E_a - i_a r_a = 235 - 1000 \cdot 0{,}005 =$$
$$= 235 - 250 \cdot 0{,}02 = 235 - 5 = 230 \text{ вольт.}$$

Предположим теперь, что вследствие какой-нибудь несимметрии (в обмотке ли, в магнитной ли системе) эл.-дв. силы в отдельных параллельных цепях будут неодинаковы.

Например: $e_1 = 237$;
$e_2 = 240$;
$e_3 = 232$;
$e_4 = 231$.

Если при этом мы предположим, что напряжение на зажимах машины останется неизменным и равным образом останутся попрежнему одинаковыми сопротивления отдельных параллельных цепей ($r_a = 0{,}02\ \Omega$), то можно высчитать, какой ток будет в этом случае отдавать каждая параллельная цепь. Очевидно, для каждой параллельной цепи можно написать равенство:

$$E_k = e_a - i_a r_a, \text{ откуда}$$
$$i_a = \frac{e_a - E_k}{r_a}.$$

Для отдельных параллельных цепей мы получим следующие токи:

1. $$i_{a_1} = \frac{e_{a_1} - E_k}{r_{a_1}} = \frac{237 - 230}{0{,}02} = 350 \text{ A;}$$

2. $$i_{a_2} = \frac{e_{a_2} - E_k}{r_{a_2}} = \frac{240 - 230}{0{,}02} = 500 \text{ A;}$$

3. $$i_{a_3} = \frac{e_{a_3} - E_k}{r_{a_3}} = \frac{232 - 230}{0{,}02} = 100 \text{ A;}$$

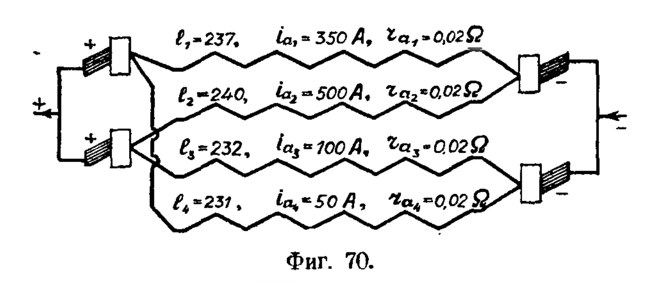
4. $$i_{a_4} = \frac{e_{a_4} - E_k}{r_{a_4}} = \frac{231 - 230}{0{,}02} = 50 \text{ A.}$$

Полученное распределение токов показано на схеме фиг. 70.

$$e_{a_1}=237,\ i_{a_1}=350\ \text{A},\ r_{a_1}=0{,}02\ \Omega.$$

Потери на нагревание будут в этом случае:

$V_{як_2}=i^2_{a_1}r_{a_1}+i^2_{a_2}r_{a_2}+i^2_{a_3}r_{a_3}+i^2_{a_4}r_{a_4}=350^2\cdot 0{,}02+$ $+500^2\cdot 0{,}02+100^2\cdot 0{,}02+50^2\cdot 0{,}02=7\,700$ ватт в *сек*, т.-е. на $7\,700-5\,000=2\,700$ ватт в секунду больше, чем при симметричном распределении нагрузки, что составит $2\,700/5\,000\cdot 100=$ $=54\%$ увеличения потерь на нагревание якоря по сравнению с нормальными потерями.



Фиг. 70.

Посмотрим, что будет происходить в машине при отсутствии отдачи тока во внешнюю сеть при принятых нами неравномерностях в эл.-дв. силах отдельных цепей.

$$e_1=237,\ e_2=240,\ e_3=232\ \text{и}\ e_4=231.$$

Составив 5 уравнений с 5 неизвестными (i_{a_1}, i_{a_2}, i_{a_3}, i_{a_4} и $E_{к_0}$ — напряжение на зажимах машины при холостом ходе), найдем все эти величины. Ур-ия эти следующие:

$$E_{к_0}=e_{a_1}-i_{a_1}r_{a_1};$$
$$E_{к_0}=e_{a_2}-i_{a_2}r_{a_2};$$
$$E_{к_0}=e_{a_3}-i_{a_3}r_{a_3};$$
$$E_{к_0}=e_{a_4}-i_{a_4}r_{a_4};$$
$$i_{a_1}+i_{a_2}+i_{a_3}+i_{a_4}=0.$$

Легко определить, что $E_{к_0}=235$ вольт.

Тогда значения для отдельных токов определятся по равенству:

$$i_a=\frac{e_a-E_{к_0}}{r_a};$$

получим:

$$1. \quad i_{a_1} = \frac{237 - 235}{0,02} = 100\ \text{A};$$

$$2. \quad i_{a_2} = \frac{240 - 235}{0,02} = 250\ \text{A};$$

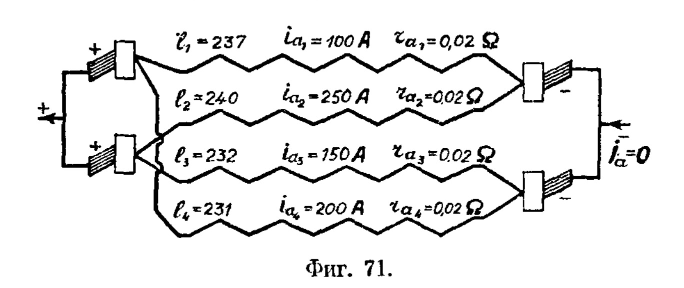
$$3. \quad i_{a_3} = \frac{232 - 235}{0,02} = -150\ \text{A};$$

$$4. \quad i_{a_4} = \frac{231 - 235}{0,02} = -200\ \text{A}.$$

Для проверки пишем:

$$100 + 250 - 150 - 200 = 0.$$

Знак минус перед 3-м и 4-м значением i_a показывает, что в этих параллельных цепях токи направлены в противоположном направлении с токами в первых двух цепях, т.-е. от положительной щетки к отрицательной.



Фиг. 71.

Эти токи и при машине, работающей вхолостую, вызывают потери, величина которых равна:

$V_{як_3} = 100^2 \cdot 0,02 + 250^2 \cdot 0,02 + 150^2 \cdot 0,02 + 200^2 \cdot 0,02 = 2\,375$ ватт в *сек*, что составит $2\,375/5\,000 \cdot 100 = 47,5\%$ от нормальных потерь при полной нагрузке машины и симметричной работе всех параллельных цепей.

$$e_1 = 237; \qquad r_{a_1} = 0,02\ \Omega.$$

Таким образом мы при несимметрии в работе отдельных параллельных цепей получаем:

1) лишние потери энергии,

2) перегрузку током проводников обмотки и, следовательно, перегрев их с возможностью перегорания обмотки.

3) перегрузку током отдельных щеток с возможностью искрения под ними.

Отсюда ясно, какое значение приходится придавать требованиям симметрии обмотки.

12. Уравнительные, или эквипотенциальные, соединения.

Одним из действительных средств для разгрузки щеток от добавочных токов и, следовательно, от искрения при неравных эл.-дв. силах, получающихся вследствие каких-либо причин в разных параллельных цепях, являются так называемые уравнительные, или эквипотенциальные, соединения внутри машины. При устройстве эквипотенциальных соединений электрически связывают между собой точки обмотки, имеющие при равномерном распределении эл.-дв. сил в отдельных параллельных цепях одинаковые потенциалы при всяком положении якоря, вращающегося в магнитном поле. Тогда при нарушении симметрии вследствие каких-либо причин равенство потенциалов в этих точках нарушается, и уравнительные токи пойдут уже не через щетки и соединительные между ними проводники, а через эти внутренние эквипотенциальные соединения.

Причинами разных эл.-дв. сил, индуктированных в отдельных параллельных цепях, могут быть:

1. Несимметрия обмотки.

$$\frac{S}{Z} \neq \text{цел. числу} \text{ (не всегда необходимо);}$$

$$\frac{K}{a} \neq \text{цел. числу;}$$

$$\frac{Z}{a} \neq \text{цел. числу;}$$

$$\frac{2p}{a} \neq \text{цел. числу.}$$

2. Неравномерное распределение магнитных полей под разными полюсами. Усиление одних и ослабление других.

Причиной неравномерности магнитных полей может быть:

а) эксцентричность расположения якоря между полюсами, вызывающая уменьшение междужелезного пространства между якорем и полюсом в одних местах и увеличение этого пространства

в других местах. В частности, причиной эксцентричности бывает просадка вала якоря в подшипниках.

б) Неравномерность материала полюсов и ярма, раковины и пр.

в) Неодинаковая форма полюсных башмаков.

3. Кроме того, как мы видели, при многократных обмотках чередование четного и нечетного числа витков вызывает всегда некоторую неравномерность между отдельными параллельными цепями.

4. Наконец причиной уравнительных токов между отдельными параллельными цепями может быть неравенство сопротивлений отдельных параллельных цепей.

Прежде чем перейти к определению точек равного потенциала и шага уравнительных соединений, рассмотрим способ изображения обмоток при помощи векторного изображения эл.-дв. сил, индуктированных в отдельных элементах, и векторных многоугольников, представляющих сумму эл.-дв. сил отдельных элементов и определяющих общую эл.-дв. силу машины (при помощи потенциальных многоугольников Оссанны).

В самом начале настоящего отдела мы видели, что эл.-дв. силы, индуктирующиеся в отдельных активных сторонах, суть величины переменные по величине и знаку, изменение которых с некоторым допущением может быть принято происходящим по закону синуса. В силу этого эл.-дв. сила каждого такого элемента может быть представлена в виде некоторого вектора, вращающегося с угловой скоростью $\omega = 2\pi c$ [1]) и мгновенные значения которого определяются проекциями этого вектора на неподвижную линию. В силу сдвига в магнитном поле отдельных активных сторон эл.-дв. силы в них достигают своих максимальных и минимальных значений не одновременно и позднее одна другой. В векторных диаграммах поэтому эл.-дв. силы отдельных активных сторон представятся в виде векторов, сдвинутых один по отношению к другому на угол, соответствующий сдвигу активных сторон одной по отношению к другой в магнитном поле. Сдвигу в магнитном поле на одно полюсное деление соответствует угол в $180^\circ_{эл.}$ Отсюда может быть определен переход от сдвига в магнитном поле $\pm f$, измеренного числом пропущенных делений элементарных впадин, к углу между векторами эл.-дв. сил a,

[1]) c — так называемая частота переменного тока $= \frac{p \cdot n}{60}$.

измеренному угловыми эл. градусами. Имея в виду, что одному полюсному делению соответствует сдвиг в магнитном поле $\tau = Z_{эл}/2p$, а, с другой стороны, угол в 180° эл., имеем:

$$\alpha^{\circ}_{эл} = \frac{\pm f \cdot 180^{\circ}_{эл} \cdot 2p}{Z_{эл}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; (79)$$

Таким образом эл.-дв. силы, индуктирующиеся в двух активных сторонах одного элемента, могут быть представлены в виде двух векторов e' и e'', сдвинутых один по отношению к другому на угол, соответствующий относительному сдвигу f этих активвых сторон в магнитном поле по отношению к своим магнитным полям (см. выше).

Суммарная эл.-дв. сила e_1, индуктирующаяся в целом элементе, определится как геометрическая сумма этих двух векторов e' и e'' (см. фиг. 72 и 73). Аналитически эта эл.-дв. сила может быть выражена через эл.-дв. силы e' и e'' следующим образом:

$$l = \sqrt{e'^2 + e''^2 - 2\, e'\, e'' \cos(180^{\circ} - \alpha)} \; . \; (80)$$

Фиг. 72.

Фиг. 73.

Так как, e' и e'', представляющие максимальные значения эл.-дв. сил в отдельных активных сторонах, обычно равны между собой, то при малом угле α можно последним пренебречь, и тогда получим:

$$e_1 = 2e' \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (81)$$

Во всяком случае при заданном расположении проводников величина e_1 может быть всегда определена.

При одинаковой величине перного частичного шага y_{z_1} во всех элементах максимальное значение суммарной величины эл.-дв. силы элементов e_1 получается одинаковым, и в векторной диаграмме все величины e_1, e_2, e_3 и т. д., изображающие эл.-дв. силы в отдельных элементах, представятся в виде одинаковых отрезков.

Если обратиться к величинам эл.-дв. сил, индуктированных в целых элементах, то можно видеть, что, соответственно сдвигу этих элементов в магнитном поле, вектора, изображающие и эти величины e_1, e_2 и т. д., будут сдвинуты между собой на углы, соответствующие этим сдвигам. При одинаковых первых частичных шагах элементов y_{z_1} („обыкновенная" обмотка) относитель-

ные сдвиги в магнитном поле элементов можно определять по сдвигу в магнитном поле начальных активных сторон элементов.

Рассмотрим первый пример петлевой обмотки, приведенный нами выше (см. фиг. 42 и 43).

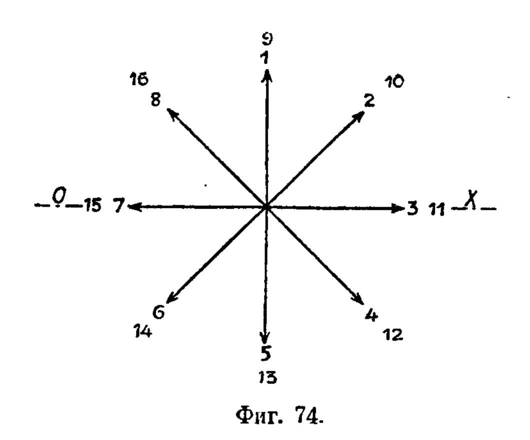
При $Z_{эл} = 16$ и $2p = 4$ одному полюсному делению, или 180° эл., соответствует $16/4 = 4$ деления элем. впадин, или одному делению зубца соответствует угол $180°_{эл}/4 = 45°_{эл}$. Так как сдвиг в магнитном поле при переходе от одного элемента к другому здесь составляет:

$$+f = y_{z\,эл} = 1,$$

то в угловых эл. единицах он равен:

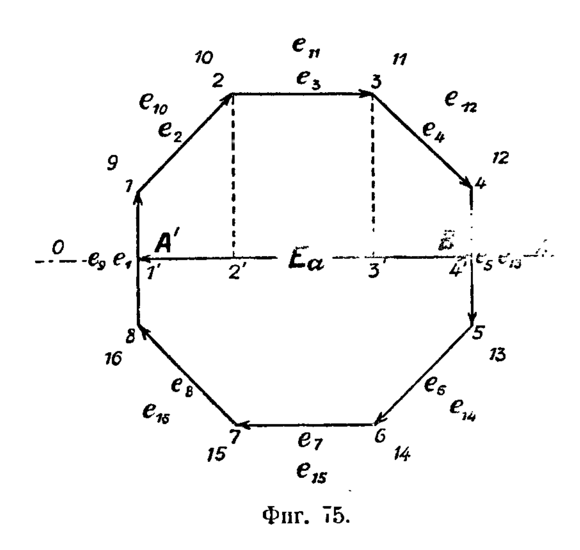
$$\alpha°_{эл} = 45°_{эл}.$$

Векторная диаграмма, представляющая собой величины эл.-дв. сил, индуктирующихся в отдельных элементах, изобразится в виде пучка векторов (см. фиг. 74). Отдельные векторы перенумерованы соответственно номерам элементов, которые мы соединяем между собой последовательно. Начальные активные стороны этих элементов лежат во впадинах под теми же номерами. Как видим, по обходе всей окружности (элементы №№ 1—8) мы получаем дальнейшие векторы (№№ 9—16), направление (и величина) которых совпадает с направлением первых векторов. Обход целой окружности (360° эл.) соответствует обходу одной пары параллельных цепей по обмотке. Мгновенные значения эл.-дв. сил представятся в виде проекций векторов на горизонтальную ось OX. Таким образом мгновенное значение эл.-дв. силы в 1-м элементе $= 0$, в 3-м элементе максимальное $= e_{max}$, в 5-м опять $= 0$, в 7-м — максимальное отрицательное $= -e_{max}$ и в 9-м опять $= 0$. Если мы захотим проследить, как суммируются между собой эл.-дв. силы элементов при обходе обмотки и каким образом



Фиг. 74.

получается результурующая эл.-дв. сила машины, мы должны производить сложение векторов геометрически. Из фиг. 75 видно, что мгновенные значения эл.-дв. сил, индуктированных в отдельных элементах, представляются в этом многоугольнике проекциями сторон многоугольника на горизонтальную ось OX, и для взятого нами момента имеем мгновенное значение эл.-дв. силы в 1-м элементе $= 0$; во втором элементе $= e_{max} \sin 45°$, для 3-го



Фиг. 75.

элем. $= e_{max} \sin 2 \cdot 45°$, для 4-го $= e_{max} \sin 3 \cdot 45°$, для 5-го $= e_{max} \sin 4 \cdot 45° = 0$, которые на рисунке представляются отрезками: для 1-го точкой $1'$, для 2-го отрезком $\overline{1'2'}$, для 3-го отрезком $\overline{2'3'}$, для 4-го отрезком $\overline{3'4'}$, для 5-го точкой 5 и т. д.

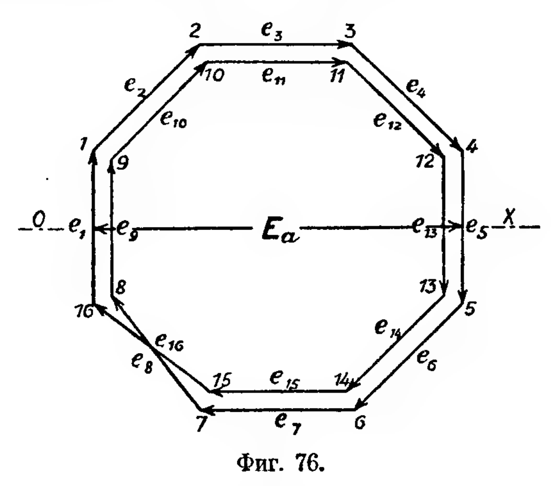
Суммарная эл.-дв. сила первой параллельной цепи для данного момента представится суммой мгновенных значений:

$$e_{a_1} = E_a = 0 + e_{max_2} \sin \alpha + e_{max_3} \sin 2\alpha + e_{max_4} \sin 3\alpha + e_{max_5} \sin 4\alpha = 0 + \overline{1'2'} + \overline{2'3'} + \overline{3'4'} + 0 = \text{отрезку } \overline{1'4'},$$

т.-е. двойной апофеме этого многоугольника или диаметру вписанной окружности. Из построения ясно, что обход половины периметра одного многоугольника соответствует обходу одной параллельной цепи, обход целого многоугольника соответствует обходу по обмотке одной пары параллельных цепей.

Так как во взятом нами примере обмотка имеет две пары параллельных цепей, нам приходится для обхода всей обмотки

обойти второй раз наш потенциальный многоугольник, при чем вследствие симметрии обмотки стороны второго многоугольника 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 и 16 налегают и вполне совпадают со сторонами первого многоугольника 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8. Для того чтобы векторное изображение эл.-дв. сил обмотки было нагляднее, часто 2-й многоугольник чертят в несколько уменьшенном масштабе (см. фиг. 76), так что получаются два вписанных многоугольника с параллельными сторонами (при симметрии обмотки).



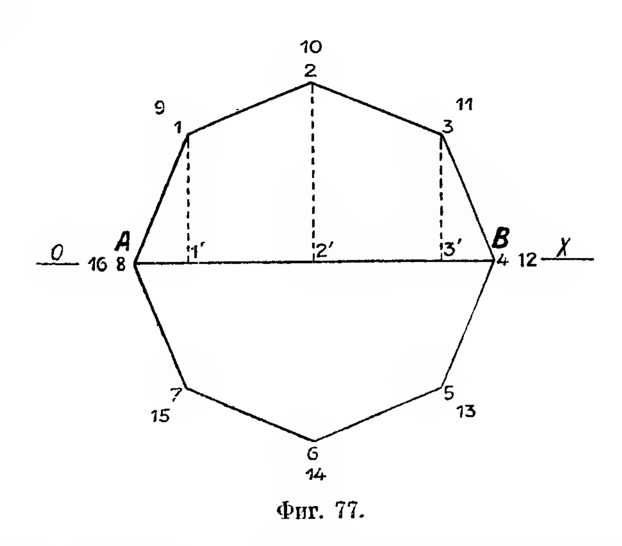
Фиг. 76.

Таким образом всякая обмотка может в векторном изображении быть представлена в виде одного или ряда таких потенциальных многоугольников. При симметричной обмотке, когда все первые частичные шаги в элементах одинаковы, а также и эл.-дв. силы элементов одинаковы между собой, многоугольники состоят из некоторого количества равных сторон, при чем каждая сторона равняется максимальной эл.-дв. силе e_{max}, которая индуктируется в каждом отдельном элементе. Мгновенные значения эл.-дв. сил в отдельных элементах равняются проекциям сторон многоугольника на неподвижную горизонтальную ось OX (см. фиг. 75). При вращении машины элементы перемещаются в магнитном поле. В соответствии с этим надо представить себе вращающимся и потенциальный многоугольник (с угловой скоростью $\omega = 2\pi c$) около своего центра, при чем конечно меняются и мгновенные значения эл.-дв. сил, индуктированных в разных элементах. Максимальное значение эл.-дв. силы в отдельном элементе получится

тогда, когда вектор, представляющий эл.-дв. силу этого элемента, примет положение, параллельное с горизонтальной осью OX, ибо вектор тогда проектируется на ось полностью, и величина его проекции $= e_{max}$. Наоборот, когда вектор эл.-дв. силы какого-либо элемента займет положение, перпендикулярное к горизонтальной оси, проекция его на горизонтальную ось представится точкой, и мгновенное значение эл.-дв. силы этого элемента будет равно нулю. Последнее положение, очевидно, будет соответствовать прохождению элемента через нейтральную ось, и, следовательно, в этих местах (по концам пересечения горизонтальной оси OX, проходящей через центр многоугольника, с периметром многоугольника) надо предполагать расположенными щетки. Положение вектора, параллельное горизонтальной оси, соответствует моменту прохождения соответствующего элемента под центром полюса. В простейшем случае, когда мы имеем симметричную обмотку с двумя активными сторонами на впадину, получаем правильный равносторонний многоугольник или ряд таких налегающих один на другой многоугольников, вокруг которого можно описать окружность. При большом числе сторон многоугольника можно принять, что периметр его сливается с описанной окружностью, и тогда можно говорить о потенциальной окружности или окружностях, изображающих какую-нибудь обмотку машины. Диаметр такой окружности дает нам суммарную эл.-дв. силу машины. Каждой паре параллельных цепей обмотки соответствует один потенциальный многоугольник или одна потенциальная окружность. Вершинам потенциального многоугольника, где кончается один вектор и начинается другой, соответствует расположение коллекторных пластин, заключенных при обходе обмотки между соответствующими элементами.

При указанном на фиг. 75 положении потенциального многоугольника величина суммарной эл.-дв. силы машины определяется величиной $\overline{A'B'}$. При предположении ширины щетки, равной ширине коллекторной пластины, можно считать, что в изображенный момент одна щетка касается двух коллекторных пластин №№ 8 и 1 (нумерацию берем по нумерации вершин многоугольника), в то время как другая налегает на коллекторные пластины №№ 4 и 5. Другое крайнее, при вращении потенциального многоугольника, положение будет тогда, когда точки 8 и 4 придут на пересечение с горизонтальной осью. Этот момент соответствует налеганию щеток только на пластины № 8 с одной стороны и

№ 4 с другой стороны. Суммарная эл.-дв. сила представится тогда отрезком AB (см. фиг. 77). Таким образом суммарная эл.-дв. сила имеет в этот момент несколько большую величину, чем при положении якоря, изображенном на фиг. 75, и представляется диаметром описанной около потенциального многоугольника окружности.



Фиг. 77.

Если мы захотим определить эл.-дв. силу между какими-либо двумя точками обмотки, например точками 1 и 3, то максимальное значение этой эл.-дв. силы предс авится вектором 1—3, образующим геометрическую сумму векторов 1—2 и 2—3, а ее мгновенное значение представится в какой-нибудь момент в виде проекции этого вектора 1—3 на горизонтальную ось OX. Максимальное значение эл.-дв. силы в этом отрезке обмотки получится также тогда, когда хорда 1—3 расположится параллельно горизонтальной оси. Нулевые значения эл.-дв. силы в этой части обмотки будут тогда, когда хорда 1—3 станет перпендикулярно к оси OX. Если снять щетки и посмотреть, как будет изменяться эл.-дв. сила между точками 8—4 обмотки, т.-е. как-раз по диаметру описанной окружности, то можно видеть, что эл.-дв. сила эта будет меняться (по закону синуса) и максимальное значение ее будет в положении, изображенном на нашем рисунке (фиг. 77), в моменты, когда диаметр 8—4 будет расположен по оси OX. Промежуточные мгновенные значения эл.-дв. силы представятся проекциями мгновенного положения вектора 8—4 на горизон-

тальную ось. Таким образом можно получить от нашей машины переменный ток, если точки 8 и 4 соединить постоянным проводом с двумя отдельными кольцами, на которые наложить щетки. Тогда диаметр 8—4 представит максимальное значение переменной эл.-дв. силы, которую машина будет давать во внешнюю сеть. Это максимальное значение переменной эл.-дв. силы, как мы видим, равняется значению общей эл.-дв. силы машины, работающей как машина постоянного тока.

Как мы видели выше, значение общей эл.-дв. силы машины постоянного тока не остается точно постоянным. Рассматривая два крайних положения обмотки, изображенные на фиг. 75 и 77, мы видим, что общая эл.-дв. сила E_a колеблется в пределах между значениями $\overline{A'B'}$ и $\overline{AB}$. Таким образом колебания значения эл.-дв. силы происходят на величину двойной стрелы хорды, представляющей величину максимальной эл.-дв. силы e_{max}, индуктированной в каждом отдельном элементе обмотки. Очевидно, в процентном отношении к общей величине эл.-дв. силы машины это колебание будет тем меньше, чем больше активных сторон в одной паре параллельных цепей или чем больше коллекторных пластин у машины, о чем мы уже говорили ранее. При большом числе элементов и, следовательно, сторон потенциального многоугольника можно принять многоугольник слитым с описанной около него окружностью и колебаниями значения общей эл.-дв. силы машины пренебречь, считая ее постоянной и равной в векторном изображении диаметру этой окружности. Так как, как мы видели выше, один потенциальный многоугольник соответствует одной паре параллельных цепей, то число сторон в каждом потенциальном многоугольнике равняется:

$$\frac{K}{a} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (82)$$

Потенциальные многоугольники дают возможность легко находить в обмотках точки равного потенциала, которые можно было бы соединить уравнительными соединениями.

Действительно, если мы обратимся к первому из только что рассмотренных примеров (фиг. 75 и 77), то, очевидно, что те коллекторные пластины, номера которых стоят на одних и тех же вершинах многоугольника (напр. 3 и 11), при всяком положении якоря во время вращения имеют одни и те же потенциалы и, следовательно, могут быть приключены к уравнительным соеди-

нениям, при чем при полной симметрии как обмотки, так и магнитного поля, по ним никакого течения тока не будет. Также очевидно, что все остальные коллекторные пластины или точки обмотки имеют отличные потенциалы от рассматриваемых. Конечно для определенного положения якоря можно было бы найти и в других половинах (напр. нижних) потенциального многоугольника точки, имеющие один и тот же потенциал с нашими (3—11) (напр. 6 и 14 на фиг. 75 и 5 и 13 на фиг. 77), но совершенно очевидно, что равенство потенциалов точек нижней половины с точками верхней половины сейчас же нарушится, как только якорь повернется на некоторый угол, ибо в одной (напр. верхней) половине потенциалы коллекторных пластин при вращении растут, приближаясь к некоторому положительному максимуму, в то время как потенциалы коллекторных пластин другой половины уменьшаются, приближаясь к отрицательному максимуму.

Таким образом в совершенно симметричной обмотке равнопотенциальных точек (для какой-нибудь произвольно выбранной одной) будет столько, сколько имеется потенциальных многоугольников в этой обмотке. Иными словами, в каждой симметричной обмотке для любой точки в одной паре параллельных цепей можно найти $a-1$ эквипотенциальных точек в остальных $(a-1)$ парах параллельных цепей. Для того чтобы из одной точки попасть в другую, ей эквипотенциальную, лежащую в следующей паре параллельных цепей (в следующем потенциальном многоугольнике), очевидно, необходимо обойти по обмотке один полный многоугольник, т.-е. надо пройти K/a элементов.

Таким образом шаг эквипотенциального соединения, измеренный по коллектору, равен:

$$y_{r_k} = K/a \text{ делений коллекторных пластин, } \quad \ldots (83)$$

или по обмотке:

$$y_{r_z\,эл} = Z_{эл}/a \text{ делений элементарных впадин} \quad \ldots (84)$$

Конечно можно было бы соединить эквипотенциальными соединениями каждую коллекторную пластину. Но, так как такое большое число соединений вызвало бы слишком большой расход на медь, удовлетворяются меньшим числом. Обычно стараются делать примерно одно соединение на впадину. Практически получается от 3 до 10 групп соединений.

13. Условия получения равнопотенциальных точек в потенциальном многоугольнике.

Как мы видели выше, шаг для эквипотенциальных точек равен $= K/a$.

Очевидно, только в том случае, когда $K/a =$ целому числу, мы имеем потенциальные многоугольники, налегающие один на другой, и точки вполне эквипотенциальные. Когда же $K/a \neq$ целому числу, вообще говоря, многоугольники получаются не сливающиеся между собой, но и в этом случае могут получиться эквипотенциальные точки и некоторые многоугольники могут совпасть между собой, именно, когда a и K имеют некоторый общий множитель, напр. t, отличный от единицы, т.-е.

$$\frac{a}{t} = \text{цел. числу и } \frac{K}{t} = \text{цел. числу} \quad \ldots (85)$$

Число точек равного потенциала в этом случает уже будет не a, а $t < a$, и шаг эквипотенциального соединения будет $y_p = K/t$. При петлевой обмотке (однократно замкнутой), так как $a = p$, условие получения эквипотенциальных точек будет (p — точек):

$$\frac{K}{p} = \text{цел. числу,} \quad \ldots \ldots \ldots (86)$$

и, если $K/p \neq$ цел. числу, то

$$\frac{p}{t} = \text{цел. числу и } \frac{K}{t} = \text{цел. числу} \quad \ldots (87)$$

(в последнем случае будет t эквипотенциальных точек).

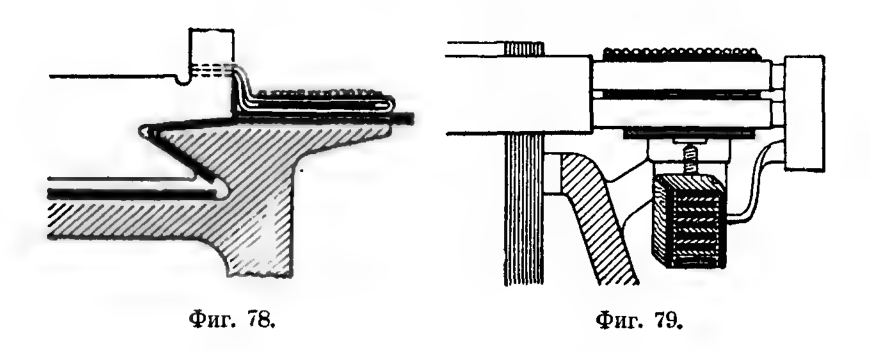
При зубчатых якорях с числом активных сторон во впадине более двух ($= u$) необходимо для того, чтобы точки имели совершенно одинаковые потенциалы, кроме выполнения только что указанных условий, еще добавочное условие, чтобы a или t активных сторон занимали во впадинах совершенно одинаковые положения, а равным образом и самые впадины были расположены совершенно симметрично. Для этого необходимо, чтобы K/a или K/t делилось нацело на $u/2$, т.-е. чтобы в первом случае

$$\frac{2K}{u \cdot a} = \text{цел. числу} \quad \ldots \ldots \ldots (88)$$

и во втором случае

$$\frac{a}{t} = \text{цел. числу и } \frac{2K}{ut} = \text{цел. числу} \ldots \quad (89)$$

Практически уравнительные соединения делаются или по коллектору между коллекторными пластинами (фиг. 78) или с задней части обмотки (см. например фиг. 79). Последнее расположе-



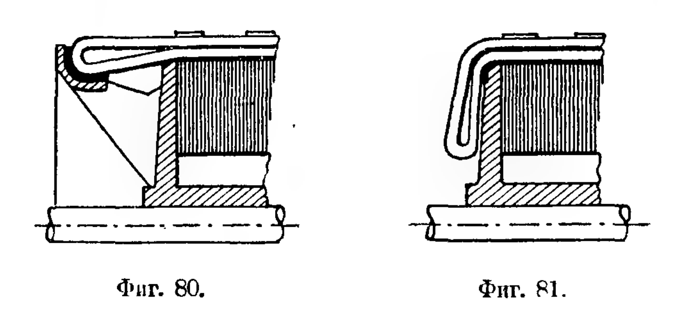
Фиг. 78. Фиг. 79.

ние удобно при стержневой обмотке якоря, когда с задней стороны приходится все равно делать спайку проводов. В случае шаблонной обмотки такое расположение уже представляет затруднения.

14. Практическое выполнение обмоток.

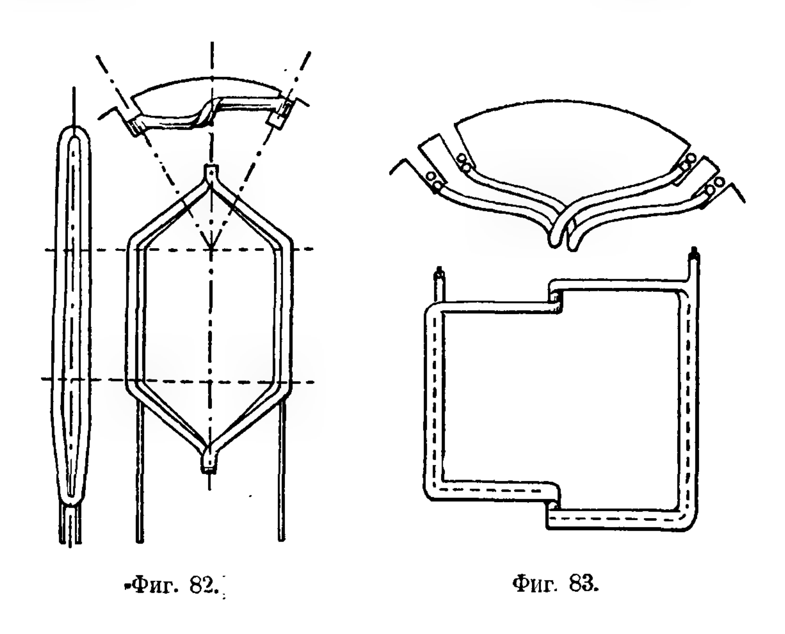
Как мы говорили выше, предпочитают делать обмотки шаблонные, т.-е. выгибать проводники на особых (обычно деревянных, иногда железных) шаблонах, затем вместе изолировать их группами из нескольких элементов, подлежащих укладке в одну и ту же впадину, и затем уже в виде целых катушек укладывать во впадины. Такой способ изготовления обмотки сокращает время, потребное для изготовления ее, и удешевляет самое изготовление. Различают катушечные и стержневые обмотки. Катушечные обмотки употребляются при малых силах тока на каждый проводник и делаются поэтому из относительно тонких проволок. При изготовлении катушек получаются обычно замкнутые секции, имеющие свободные концы только с одной стороны для присоединения к коллектору (фиг. 80, 81, 82 и 83). При больших силах токах, от 80 ампер и выше на проводник, переходят уже к стержням (фиг. 84), которые также предварительно изги-

баются на шаблонах и в изолированном виде укладываются во впадинах. Стержневые обмотки обычно имеют спайки между проводниками как с передней стороны якоря, так и с задней.



Фиг. 80. Фиг. 81.

Как те, так и другие, по форме лобовых соединений бывают цилиндрические (фиг. 80, 82 и 84) и с загнутыми вниз лобовыми соединениями (фиг. 81 и 83). Первые дают несколько более

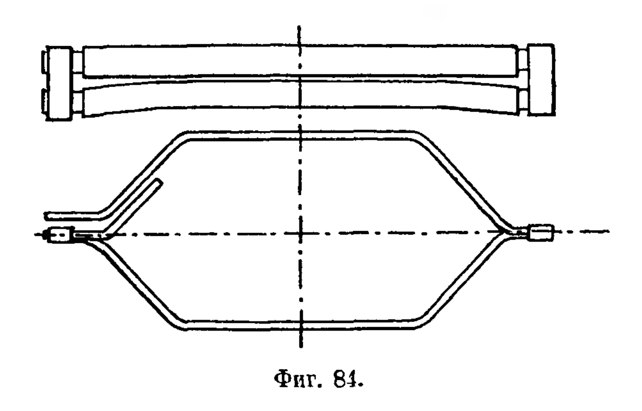


Фиг. 82. Фиг. 83.

длинный якорь, но зато более удобны для выполнения, вторые — хотя требуют меньше места в длину, но укладка лобовых соединений у них иногда вызывает некоторые затруднения вследствие ограниченности места для их укладки.

15. Число активных сторон обмотки между двумя коллекторными пластинами.

Каждая обмотка требует проверки со стороны максимального напряжения, получающегося между двумя соседними коллекторными пластинками. Оно не должно превосходить определенной величины, дабы не получилось искрения между пластинами.



Фиг. 84.

Для определения величины максимального напряжения необходимо знать число активных сторон обмотки, включенных между двумя соседними коллекторными пластинами.

Посмотрим сначала, как можно определить число активных сторон обмотки между двумя любыми пластинами коллектора, например N_1 и N_2.

Для того чтобы из пластины N_1 перейти по обмотке в пластину N_2, необходимо сделать r шагов, пропуская при каждом шаге y_k коллекторных делений. Таким образом необходимо пропустить всего

$$ry_k \text{ коллекторных делений.} \qquad (90)$$

Очевидно, $N'_2 = N_1 + ry_k$ даст нам нумер коллекторной пластины N_2, если нумерацию пластин начать с N_1 и продолжать последовательно при прохождении обмотки вплоть до пластины N_2, даже если нам при этом придется обойти коллектор несколько раз кругом (например при волновой обмотке). При таком счете N'_2 может получиться числом бо́льшим общего числа пластин нашего коллектора. Если при обходе полной окружности коллек-

тора каждый раз начинать исчисление с начала и если при переходе из пластины N_1 в пластину N_2 нам придется обойти g полных окружностей, то, очевидно, можно написать:

$$N'_2 = gK + N_2, \quad \dots\dots\dots \quad (91)$$

где K — полное число коллекторных пластин.

Отсюда:

$$N_1 + ry_k = g \cdot K + N_2; \quad \dots\dots \quad (92)$$

$$N_2 = N_1 + ry_k - gK, \quad \dots\dots\dots \quad (93)$$

где g — ближайшее меньшее число, при котором будет:

$$N_2 = N_1 + ry_k - gK < K \quad \dots\dots \quad (94)$$

Таким образом при переходе из коллекторной пластины N_1 в коллекторную пластину N_2 необходимо сделать r шагов по коллектору

$$r = \frac{(N_2 - N_1) + gK}{y_k} \quad \dots\dots\dots \quad (95)$$

Для того чтобы сдвинуться на один шаг по коллектору, мы должны пройти один элемент по обмотке. Отсюда следует, что число элементов обмотки между двумя коллекторыми пластинами N_1 и N_2 выразится тем же числом

$$r = \frac{(N_2 - N_1) + gK}{y_k} \quad \dots\dots \quad (96)$$

и число активных сторон обмотки между теми же коллекторными пластинами будет, очевидно, в два раза более, т.-е.

$$2r = 2\frac{(N_2 - N_1) + gK}{y_k} \quad \dots\dots\dots \quad (97)$$

r — всегда целое число; следовательно правая часть равенства в выражении для r также должна быть целым числом. Отсюда следует, что для g надо подобрать ближайшее меньшее число, при котором правая часть равенства будет целым числом.

Для частного случая, который собственно нас и интересует, когда пластины коллектора лежат рядом,

$$N_2 - N_1 = 1, \quad \dots\dots\dots \quad (98)$$

и число элементов, включенных между ними, будет равняться:

$$r = \frac{1 + gK}{y_k} \qquad (99)$$

Применим это выражение для различных типов обмоток.

1. Простая однократно замкнутая петлевая обмотка ($y_k = 1$)

$$r = \frac{1 + gK}{1} \qquad (100)$$

Наименьшее начение для g, при котором правая часть равенст а будет целым числом, будет $g = 0$; тогда:

$$r = \frac{(1 + 0 \cdot K)}{1} = 1 \text{ элементу} \qquad (101)$$

2. Волновая последовательная обмотка $\left(y_k = \frac{K+1}{p} \right)$;

$$r = \frac{p(1 + g \cdot K)}{K+1} \qquad (102)$$

Наименьшее число g, при котором $r =$ ц. ч., есть $g = 1$. В этом случае

$$r = p \text{ элементов} \qquad (103)$$

Тот же результат мы получим, если для шага по коллектору возьмем выражение $y_k = (K - 1)\,p$. В этом случае мы имеем неперекрещенную обмотку и при первом обходе окружности коллектора мы попадаем в соседнюю коллекторную пластину с начальной не по направлению обхода, а в другом направлении, т. е. здесь $N_2 - N_1 = -1$, и выражение для r надо писать так:

$$r = \frac{p(-1 + gK)}{K-1}.$$

Отсюда при $g = 1$ $r = p$.

3. Для последовательно-параллельной обмотки $\left(y_k = \frac{K \pm a}{p} \right)$;

$$r = \frac{p(1 + gK)}{K \pm a} \qquad (104)$$

Здесь нельзя получить простых соотношений, как в предыдущих случаях, и для каждого частного случая необходимо подыскивать

наименьшее значение для y, при котором $[p(1+yK)]:(K\pm a)$ было бы целым числом. Например, для машины, у которой

$$S=76,\ K=38,\ p=4,\ a=2,$$

$$r=\frac{4(1+y\cdot 38)}{38-2}=\frac{(1+y\cdot 38)}{9}.$$

Наименьшее значение y, при котором для r мы получим целое число, будет 4. Тогда

$$r=\frac{(1+4\cdot 38)}{9}=17.$$

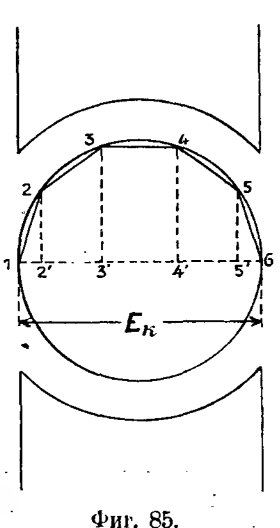
16. Средняя и максимальная разность потенциалов между двумя соседними коллекторными пластинами.

Напряжение между двумя разноименными щетками, расположенными на коллекторе, равно полному напряжению машины E_k.

Число коллекторных пластин, приходящееся на часть коллектора между двумя соседними щетками, равно $K/2p$.

Если бы полное напряжение E_k распределялось равномерно между всеми коллекторными пластинами, находящимися между двумя соседними щетками, то среднее напряжение, приходящееся на один промежуток между двумя пластинами, равнялось бы

$$e_{ak\,cp}=\frac{E_k}{K/2p}=\frac{2p\cdot E_k}{K}. \quad . \quad . \quad (105)$$



Фиг. 85.

На самом деле напряжения между каждыми двумя соседними пластинами коллектора не будут равны между собой в силу неравенства в каждый данный момент эл.-дв. сил, индуктирующихся в элементах обмотки, включенных между коллекторными пластинами. (См. потенциальный многоугольник Оссанны, напр., фиг. 85.)

Обозначая максимальную эл.-дв. силу, индуктирующуюся в одном элементе обмотки, через e_{max} и приравнивая, при боль-

шом числе сторон, периметр многоугольника Оссанны длине окружности (диам. E_a), получим (при холостом ходе $E_a = E_k$):

$$\frac{K}{a} \cdot e_{max} = \pi E_k, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (106)$$

так как число сторон в потенциальном многоугольнике при a парах параллельных ветвей равно K/a, или

$$e_{max} = \frac{\pi \cdot a \cdot E_k}{K}. \quad \ldots \ldots \ldots \quad (107)$$

Отсюда, зная максимальную эл.-дв. силу, индуктирующуюся в одном элементе обмотки, и зная число элементов, включенных между двумя соседними коллекторными пластинами (см § 19), легко можно определить и максимальное напряжение между двумя соседними коллекторными пластинами каждой обмотки.

1. Так петлевой обмотки однократно замкнутой ($a = p$) мы имели, что между двумя соседними коллекторными пластинами включена только одна катушка (один элемент). Следовательно при этой обмотке максимальное напряжение между двумя соседними коллекторными пластинами будет:

$$e_{dk_{max}} = 1 \cdot e_{max} = e_{max}. \quad \ldots \ldots \ldots \quad (108)$$

2. Для многократно замкнутой или многократно непрерывной обмоток, где $a = i \cdot p$, между началом и концом одной катушки лежит i коллекторных пластин. Полагая, что e_{max} распределяется равномерно между всеми i пластинами, получим максимальное напряжение между двумя соседними коллекторными пластинами:

$$e_{dk_{max}} = \frac{1}{i} \cdot e_{max} = \frac{e_{max}}{i}. \quad \ldots \ldots \ldots \quad (109)$$

3. При последовательной волновой обмотке ($a = 1$) между двумя соседними коллекторными пластинами включено p элементов обмотки; следовательно максимальное напряжение между двумя соседними пластинами будет:

$$e_{dk_{max}} = p \cdot e_{max}. \quad \ldots \ldots \ldots \quad (110)$$

4. Для последовательно-параллельной обмотки, когда $a > 1$, между началом и концом первого незамкнутого полигона (состоя-

щего из p элементов), как известно, находится a коллекторных пластин.

Максимальное напряжение, индуктирующееся в этом полигоне, будет равно $p \cdot e_{max}$.

Предполагая, что это напряжение равномерно распределяется между всеми a коллекторными делениями, лежащими между концами этого полигона, получим максимальное напряжение, приходящееся на один промежуток между двумя соседними пластинами коллектора.

$$e_{dk_{max}} = \frac{p}{a} e_{max} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (111)$$

При этом, если p/a не целое число, для расчетов берут обычно ближайшее большее целое число.

К этому же виду могут быть приведены выражения для максимального напряжения между двумя соседними коллекторными пластинами и в первых трех случаях.

Так для петлевой однократно замкнутой обмотки $p/a = 1$ (так как здесь $a = p$), то следовательно

$$e_{dk_{max}} = 1 \cdot e_{max} = \frac{p}{a} e_{max} \quad \ldots \ldots \quad (112)$$

Для многократно замкнутой петлевой обмотки, где $a = ia'$ и $a' = p$, следовательно

$$\frac{p}{a} = \frac{p}{a'i} = \frac{1}{i}; \quad \ldots \ldots \ldots \quad (113)$$

отсюда имеем:

$$e_{dk_{max}} = \frac{1}{i} e_{max} = \frac{p}{a'i} e_{max} = \frac{p}{a} e_{max} \quad \ldots \quad (114)$$

Для последовательной волновой обмотки $a = 1$; отсюда

$$e_{dk_{max}} = p \cdot e_{max} = \frac{p}{a} e_{max} \quad \ldots \ldots \quad (115)$$

Таким образом общее выражение для максимального напряжения между двумя соседними коллекторными пластинами будет:

$$e_{dk_{max}} = \left(\frac{p}{a}\right)_{ц.ч.} \cdot e_{max} = \frac{\pi \cdot a \cdot E_k}{K} \cdot \left(\frac{p}{a}\right)_{ц.ч.} \quad \ldots \quad (116)$$

при чем предполагается, что на коллектор наложено p пар щеток.

Это максимальное напряжение рекомендуется брать не свыше 30—35 вольт. В отдельных только случаях (при малых машинах) иногда возможно бывает допустить это напряжение до 50 вольт.

P. S. Lamme считает, что при мика-изоляции между пластинами толщиной в 0,8 *мм* для больших машин среднего напряжения можно допускать напряжение между пластинами коллектора до 28 V, для средних мощностей — до 30 V. Для небольших машин (например, в 100 kW) при той же толщине изоляции допустимо максимальное напряжение до 35 V и только для совсем маленьких машин можно допустить 50 V.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА.

1. Расчет ампер-витков для магнитов, ярма, стыков между магнитами и ярмом и железа якоря.

Как известно, магнитный поток (Φ), магнитодвижущая сила $= 0{,}4\,\pi \cdot iw$) и магнитное сопротивление [R_m $l/(\mu \cdot Q)$] связаны между собой тем же соотношением, что и электрические величины: ток, напряжение и электрическое сопротивление, т.-е.

$$\Phi = \frac{M.\text{-}дв.\ с.}{R_m} = \frac{0{,}4\,\pi \cdot iw}{\dfrac{l}{\mu \cdot Q}} \quad \ldots\ldots \quad (117)$$

Если магнитная цепь подразделяется на несколько последовательно соединенных между собой отдельных участков, имеющих каждый свое сечение и свой материал (свою магнитную проницаемость μ), то, как и в электрической цепи, общее сопротивление цепи R_m можно представить в виде суммы сопротивлений отдельных участков.

$$R_m = \frac{l_1}{\mu_1 Q_1} + \frac{l_2}{\mu_2 Q_2} + \frac{l_3}{\mu_3 Q_3} + \ldots\ldots \quad (118)$$

Закон магнитной цепи тогда представится в виде:

$$\Phi = \frac{0{,}4\,\pi \cdot iw}{\dfrac{l_1}{\mu_1 Q_1} + \dfrac{l_2}{\mu_2 Q_2} + \dfrac{l_3}{\mu_3 Q_3} + \ldots} \quad \ldots\ldots \quad (119)$$

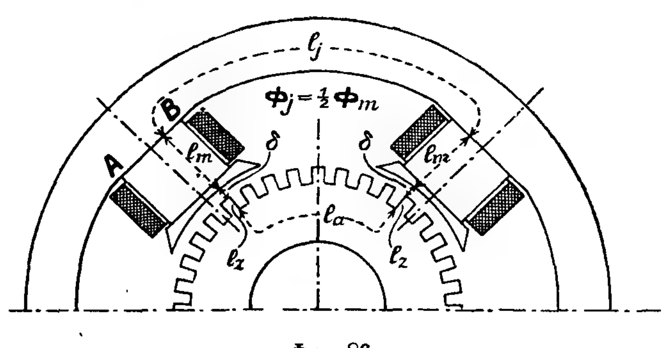
Отсюда

$$0{,}4\,\pi \cdot iw = 1{,}25\, iw = \frac{\Phi l_1}{\mu_1 Q_1} + \frac{\Phi l_2}{\mu_2 Q_2} + \frac{\Phi l_3}{\mu_3 Q_3} + \ldots \quad (120)$$

или, так как $\frac{\Phi}{Q} = B$ — магнитной индукции,

$$iw = 0{,}8 \cdot \frac{B_1 l_1}{\mu_1} + 0{,}8 \frac{B_2 l_2}{\mu_2} + 0{,}8 \frac{B_3 l_3}{\mu_3} + \ . \ . \quad (121)$$

Расчет магнитной цепи водится к нахождению числа ампервитков, которое необходимо дать машине в виде обмотки магнитов, чтобы создать необходимый поток в железе якоря и получить таким образом заданную эл.-дв. силу в якорной обмотке.



Фиг. 86.

Магнитную цепь электрических машин постоянного тока делят обычно на пять участков, при чем в каждой машине рассчитывают только одну магнитную цепь, охватывающую пару соседних полюсов, и полученные ампер-витки увеличивают в зависимости от полного числа имеющихся в машине магнитных цепей.

Отдельные участки каждой магнитной цепи (см. фиг. 86) следующие:

1. Магнитные сердечники, числом два (северный и южный полюса), при длине каждого l_m *см* и сечении Q_m *см*^{2}.

2. Ярмо машины на участке, соединяющем два соседних полюса между собой, средней длиной l_j и сечением Q_j.

3. Два междужелезных пространства между полюсными поверхностями и якорем, длиной каждое δ *см* и со средним сечением Q_l.

4. Два рабочих слоя якоря, занятых зубцами и впадинами, длиной каждый l_z и со средним сечением Q_z.

5. Железо якоря на участке между двумя соседними полюсами, длиной l_a и сечением Q_a.

Таким образом написанное выше равенство (121) для машины постоянного тока можно переписать таким образом:

$$iw = 2 \cdot 0{,}8 \frac{B_m l_m}{\mu_m} + 0{,}8 \frac{B_j l_j}{\mu_j} + 2 \cdot 0{,}8 \frac{B_l \delta}{\mu_l} + \\ + 2 \cdot 0{,}8 \frac{B_z l_z}{\mu_z} + 0{,}8 \frac{B_a l_a}{\mu_a}, \quad \ldots \ldots \quad (122)$$

или, имея в виду, что для воздуха $\mu_l = 1$, и с другой стороны $0{,}8 \frac{B}{\mu} = 0{,}8\ H = aw$, где aw есть число ампер-витков на 1 *см* длины пути магнитопровода при данной магнитной индукции B,

$$iw = 2 \cdot aw_m l_m + aw_j l_j + 2 \cdot 0{,}8 B_l \delta + \\ + 2 \cdot aw_z l_z + aw_a l_a \quad \ldots \ldots \quad (123)$$

В случае, если сердечники магнитов не составляют одного целого с ярмом машины, что часто бывает в современных машинах, необходимо в правой части последнего равенства добавить еще шестой член, учитывающий сопротивление воздушного зазора δ_m в местах соединения магнитных сердечников с ярмом (таких зазоров будет два, по одному на каждый полюс).

$$2 \cdot 0{,}8 \cdot B_m \delta_m, \quad \ldots \ldots \quad (124)$$

где можно взять $\delta_m \cong 0{,}01—0{,}03$ *см* на один зазор.

При обычном ходе расчета магнитный поток Φ определяется в зависимости от эл.-дв. силы E_a, которую нужно получить от машины:

$$\Phi = \frac{60}{p \cdot n} \cdot \frac{a}{N} \cdot E_a \cdot 10^{-8} \quad \ldots \ldots \quad (125)$$

При определенных размерах якоря подбирают сечение отдельных частей магнитопровода таким образом, чтобы для магнитных индукций получились подходящие значения в пределах, установленных практикой. Чем больше берутся значения магнитной индукции, тем меньше получаются отдельные размеры машины. С другой стороны, увеличение индукции, вследствие магнитного насыщения железа, требует относительно большего числа ампер-витков возбуждения, а следовательно, и относительно большего расхода меди на обмотку магнитов. Обычные пределы для значений магнитной индукции в отдельных частях машины следующие:

1. Магнитная индукция в воздухе (при зубчатых якорях):

для малых машин . . . . . $B_l = 5\,000$ до $7\,000$
для больших машин . . . . $B_l = 7\,000$ до $11\,000$.

Большие величины имеют значение для машин большей мощности и более тихоходных, меньшие значения — для малых машин и быстроходных. При быстроходных машинах с высокой частотой $c = \frac{p \cdot n}{60} > 25$—$30$, как, например, турбогенераторах, магнитную индукцию выбирают значительно меньшей, чем при тихоходных (уменьшение индукции достигает 40% и более при одном и том же диаметре машин).

2. Магнитная индукция в зубцах. Обычно в качестве предельных норм для магнитной индукции в зубцах дается так называемая теоретическая индукция в самом тонком месте зубца (у его основания) $B_{zm\,max}$. При вычислении теоретической индукции предполагается, что весь магнитный поток проходит только через зубцы, минуя впадины якоря.

Эта теоретическая магнитная индукция $B_{zm\,max}$ берется не свыше 23 000—25 000 в зависимости от частоты тока $c = \frac{p \cdot n}{60}$.

Ее можно выбрать, пользуясь эмпирической формулой:

$$B_{zm\,max} = \frac{\text{от } 22\,000 \text{ до } 25\,000}{1 + 0{,}007 \cdot c} \quad \ldots\ldots \quad (126)$$

3. Максимальная индукция в железе якоря. Обычно выбирают в зависимости от частоты:

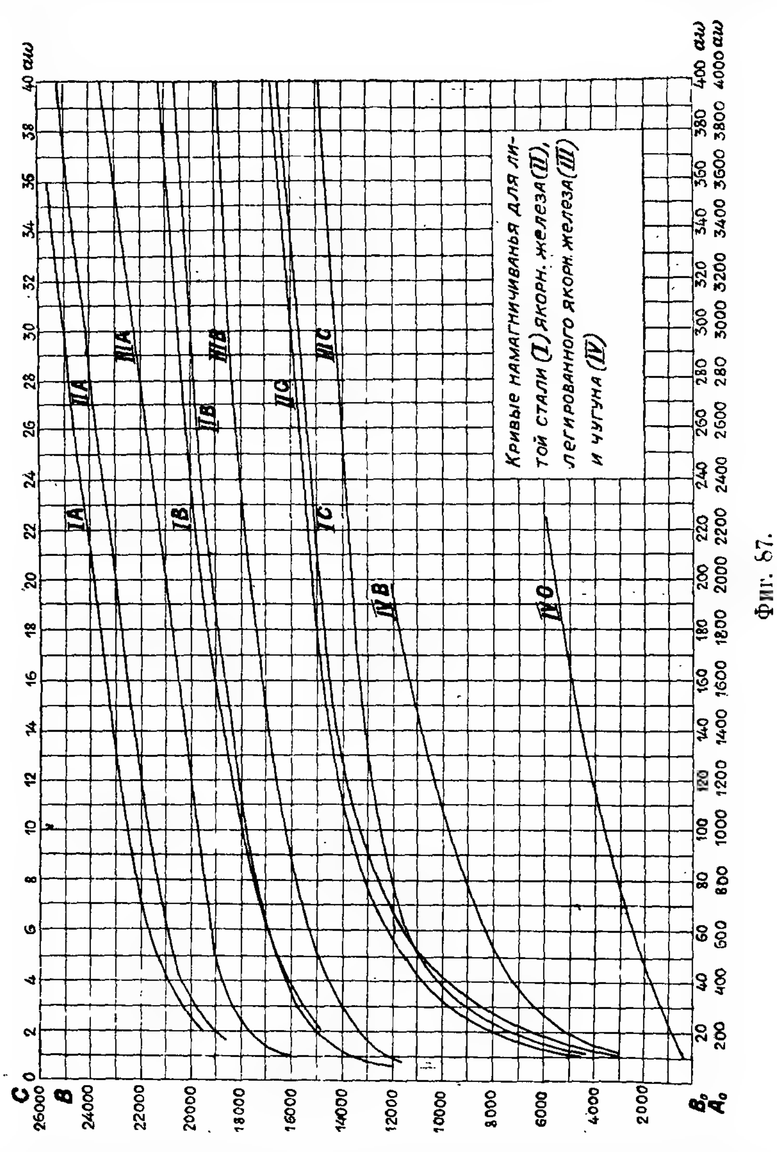
$c = \frac{p \cdot n}{60}$	B_a
от 5 до 20	16 000—12 000
„ 20 „ 30	13 000—10 000
„ 30 „ 60	11 000— 8 000

4. Магнитная индукция в сердечнике магнитов:

При сердечниках из ковкого железа	B_m
или стального литья	15 000—17 500
Ярмо. При ярме из ковкого железа	B_j
или стального литья	13 000—16 000
из чугуна	7 500— 9 000

Зная сечение отдельных частей магнитной цепи, можно на основании примеров конструкций существующих машин набросать

эскиз проектируемой машины с таким расчетом, чтобы на магнитах могла разместиться обмотка. По эскизу определяют длины



Фиг. 87.

отдельных участков магнитной цепи. С другой стороны, имея опытные кривые зависимостей магнитной индукции B от ампер-витков на 1 *см* пути магнитопровода (*aw*), т.-е. $B = f(aw)$ (см. фиг. 87), для данных сортов железа и чугуна, легко опреде-

ляют по найденным величинам магнитных индукций и общее число витков для отдельных участков магнитопровода.

$$AW_m = 2 \cdot aw_m \cdot l_m \quad \ldots\ldots \quad (127)$$
$$AB_j = aw_j \cdot l_j \quad \ldots\ldots \quad (128)$$
$$AW_a = aw_a \cdot l_a \quad \ldots\ldots \quad (129)$$
$$AW\delta_m = 2 \cdot 0{,}8 \cdot B_m \cdot \delta_m \quad \ldots\ldots \quad (130)$$

(последнее для стыков между магнитвыми сердечниками и ярмом).

Особо приходится определять ампер-витки для междужелезного пространства AW_l и для рабочего слоя AW_z, так как в этих обоих случаях сечение магнитопровода не является постоянным на протяжении всего участка.

2. Расчет ампер-витков для междужелезного пространства.

Из выражения для ампер-витков междужелезного пространства

$$AW_l = 2 \cdot 0{,}8 \cdot B_l \delta \quad \ldots\ldots \quad (131)$$

видно, что для определения величины этих ампер-витков при известном δ необходимо найти предварительно B_l.

Для определения B_l нужно знать сечение Q_l междужелезного пространства под полюсом, по которому проходит магнитный поток

$$B_l = \frac{\Phi}{Q_l} \quad \ldots\ldots \quad (132)$$

Так как сечение Q_l не одинаково в местах выхода магнитных линий из полюса (F_p) и входа в якорь (F_a), то для расчета берут среднее значение из этих двух величин

$$Q_l = \frac{1}{2}(F_p + F_a) \quad \ldots\ldots \quad (133)$$

Здесь

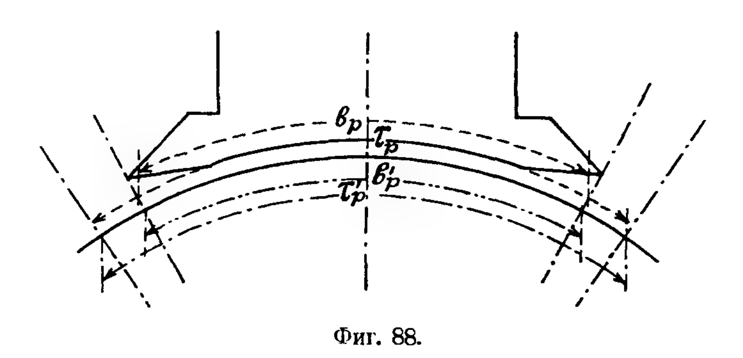
$$F_p = b_p \cdot l_p, \quad \ldots\ldots \quad (134)$$

где b_p есть ширина полюсного башмака по дуге выточки полюсов и l_p — его длина вдоль оси вала машины. Обычно полюсную дугу b_p выбирают в долях от полюсного деления τ_p, взятого по окружности выточки полюсов.

$$b_p = \alpha \tau_p \quad \ldots\ldots \quad (135)$$

Величину a берут для машин без добавочных полюсов . . . . $= 0{,}6 - 0{,}8$
и для машин с добавочными полюсами . $= 0{,}5 - 0{,}7$.

Поверхность якоря, в которую входят магнитные линии, несколько шире проекции полюсной дуги на якорь (см. фиг. 88).



Фиг. 88.

Согласно опытным данным [1]) можно принять длину дуги окружности якоря, b_a, по которой магнитные линии входят в якорь, равной:

$$b_a = a\tau'_p + 4\delta, \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (136)$$

где $\tau'_p = \frac{\pi D}{2p}$ есть длина полюсного деления, отнесенного к окружности якоря, а $a = \frac{b_p}{\tau_p}$ — величина отношения полюсной дуги b_p к полюсному делению τ_p, взятому по окружности выточки полюсов. Очевидно $b'_p = a\tau'_p$ есть проекция дуги $b_p = a\tau_p$ на окружность якоря. Также очевидно, что

$$a = \frac{b_p}{\tau_p} = \frac{b'_p}{\tau'_p} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (137)$$

Размер поверхности якоря, в которую входят магнитные линии, в направлении оси машины можно практически взять равным длине якоря без вентиляционных каналов

$$L_1 = L_a - L_v, \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (138)$$

---

[1]) K. Pichelmayer. Dynamobau.

где L_a — полная длина якоря по оси, включая вентиляционные каналы и L_v — суммарная длина каналов в том же направлении.

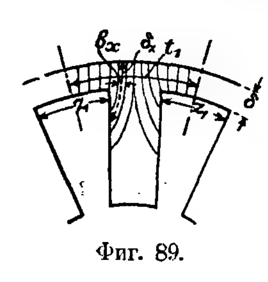
Таким образом

$$F_a = b_a L = (a\tau'_p + 4\delta)(L_a - L_v) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (139)$$

Зная F_p и F_a, можно по ф-ам (133) и (132) найти Q_l и B_l. Для гладких якорей отсюда, согласно выражению (131), можно найти:

$$AW_l = 2 \cdot 0{,}8 \cdot B_l \cdot \delta.$$

Для зубчатых якорей приходится учитывать сгущение магнитных линий над зубцами и ответвление магнитных линий во впадины. Для последних путь магнитных линий по воздуху получается больше междужелезного пространства δ между полюсом и железом зубцов. В силу сгущения магнитных линий над зубцами и большего пути магнитных линий по воздуху в междужелезном пространстве получается большее магнитное сопротивление и больше будет потребное число ампер-витков AW_l.



Фиг. 89.

Для того чтобы учесть увеличение магнитного сопротивления междужелезного пространства вследствие наличия впадин, обычно в вышеприведенном выражении для AW_l вместо δ берут бо́льшую величину

$$\delta' = k_1 \cdot \delta, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (140)$$

где k_1 есть некоторый коэффициент, больший единицы.

При определении этого коэффициента k_1 поступают следующим образом. Проводимость междужелезного пространства гладкого якоря на одно деление впадины t_1 при длине якоря в 1 *см* равна:

$$\frac{t_1}{\delta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (141)$$

На эскизе деления зубца (см. фиг. 89) наносят от руки распределение магнитных трубок, принимая во внимание, что места выхода магнитных линий из железа можно считать приблизительно перпендикулярными к поверхности железа (закон прело-

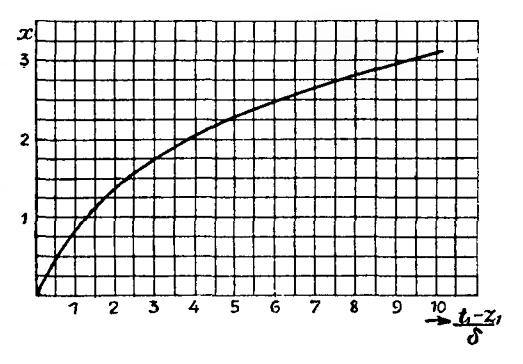
мления магнитных линий). Тогда проводимость зубчатого якоря на одну впадину при длине якоря в 1 *см* можно найти как сумму

$$\sum \frac{b_x}{\delta_x}, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (142)$$

при чем рекомендуется для определения этой суммы сделать несколько рисунков распределения магнитных линий и принять за правильное то, при котором эта сумма окажется большей.

Отсюда, так как магнитные сопротивления обратны магнитным проводимостям, можно определить и коэффициент увеличения сопротивления

$$k_1 = \frac{t_1}{\delta \sum \frac{b_x}{\delta_x}} \quad \ldots (143)$$



Фиг. 90.

Для того чтобы избежать вычерчивания магнитных линий, можно воспользоваться формулою, предлагаемой проф. Арнольдом.

$$k_1 = \frac{t_1}{z_1 + \delta x}, \quad \ldots\ldots\ldots (144)$$

где x есть величина, зависящая от ширины впадины $(t_1 - z_1)$ и междужелезного пространства (δ). Эту величину берут по кривой фиг. 90, определенной на основании расчета для ряда наиболее часто встречающихся соотношений между размерами впадины в зависимости от отношения $\frac{t_1 - z_1}{\delta}$.

Проф. Оссанна рекомендует для вычисления коэффициента k_1 формулу проф. Кутта:

$$k_1 = \frac{t_1}{t_1 - (t_1 - z_1) y}, \quad \ldots\ldots\ldots (145)$$

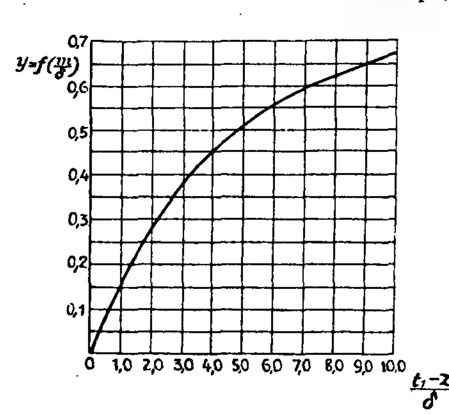
где y_1 берется по кривой фиг. 91 в зависимости от того же соотношения $\frac{t_1 - z_1}{\delta}$.

Третья эмпирическая формула, иногда употребляющаяся:

$$k_1 = \frac{t_1 + 8\delta}{z_1 + 8\delta} \quad \dots\dots\dots\dots (146)$$

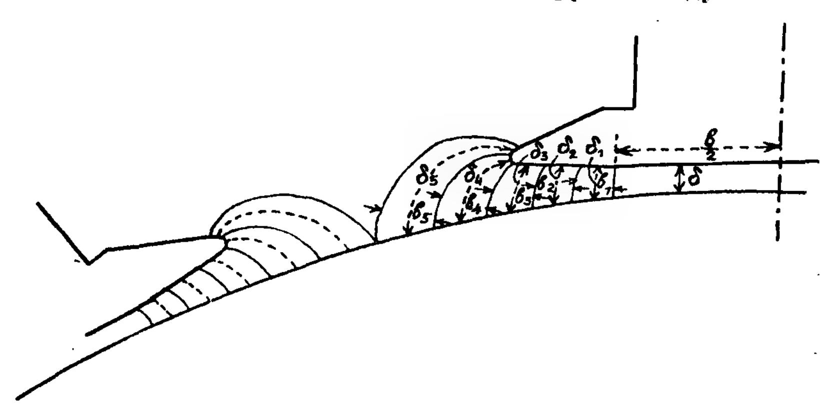
дает обычно несколько бо́льшие величины, чем первые две.

Более точным является непосредственное вычисление на основании на глаз нанесенного распределения магнитных трубок (см. выше).



Фиг. 91.

Методом нанесения картины распределения магнитных трубок пользуются иногда и для непосредственного определения числа ампер-витков для междужелезного пространства AW_l. Этот метод (более точный) особенно важен в тех случаях, когда междужелезное пространство под полюсом сильно меняется. В этом случае (см. фиг. 92) вычерчивают на-глаз распределение магнитных трубок между полюсом



Фиг. 92.

и якорем и определяют проводимость отдельных трубок. Ампервитки, необходимые для проведения магнитного потока Φ через междужелезное пространство, равны:

$$AW_l = 2 \cdot 0,8 \cdot \Phi \cdot R_{m_l} = 2 \cdot 0,8 \cdot \Phi \cdot \frac{1}{\lambda_l}, \quad \dots (147)$$

где λ_l есть суммарная проводимость междужелезного пространства.

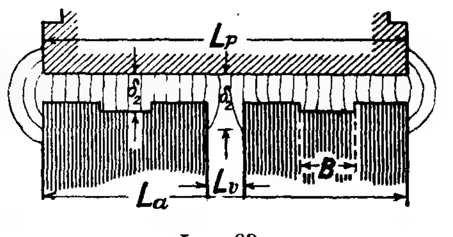
Суммарную проводимость можем определить как сумму проводимостей всех получившихся на рисунке магнитных трубок.

$$\lambda_l = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \cdots + \lambda_n, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (148)$$

где

$$\lambda_1 = \frac{q_1}{\delta_1}, \quad \lambda_2 = \frac{q_2}{\delta_2}, \quad \lambda_3 = \frac{q_3}{\delta_3}, \quad . \quad . \quad \lambda_n = \frac{q_n}{\delta_n} \quad . \quad . \quad . \quad (149)$$

Здесь сечение трубки q определяем как произведение из средней ширины трубки (по рисунку) b на длину $\frac{L_p + L}{2}$, равную средней арифметической из длины полюса и длины якоря за вычетом вентиляционных каналов. Точнее, конечно, было бы начертить эскиз и разрезы якоря в осевом направлении (см. фиг. 93) и нанести и в этом сечении магнитные трубки, при чем можно учесть как вентиляционные каналы, так и выточки для бандажей в случае наличия их, а также трубки с лобовых сторон.



Фиг. 93.

По нанесении трубок можно для вычисления составить следующую таблицу:

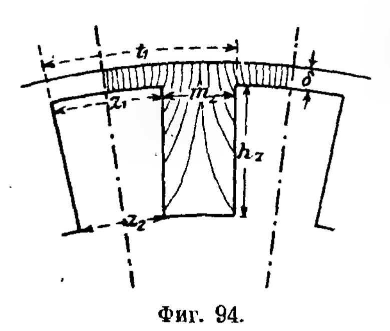
ТАБЛИЦА.

№№ трубок	Средняя ширина трубок b	Средняя длина трубки δ_x	Среднее сечение трубки $q = b\,\frac{L+L_p}{2}$	Проводимость $\lambda_x = \frac{q_x}{\delta_x}$
1				
2				
3				
4				
.				
.				
.				
n				

$\lambda_l = \Sigma\lambda =$

3. Определение ампер-витков для рабочего слоя AW_z.

При переходе магнитных линий из полюсов в якорь часть магнитных линий проходит через головку зубца, часть же принуждена проходить через воздушное пространство впадин (см. фиг. 94). Обозначив через t_1 деление зубца и через B_l магнитную индукцию в междужелезном пространстве, получим магнитный поток, приходящийся на одно деление зубца:



Фиг. 94.

$$\Phi_{t_1} = B_l \cdot t_1 \cdot L, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (150)$$

где L — длина якоря без вентиляционных каналов. При входе в рабочий слой (зубец + впадина) этот поток разделяется, как мы сказали, на две части: Φ_z — поток, входящий в головку зубца, и Φ_m — поток, входящий во впадину. Очевидно

$$\Phi_{t_1} = \Phi_z + \Phi_m \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (151)$$

Железо одного зубца имеет чистое сечение железа, равное

$$Q_z = z \cdot k_2 \cdot L, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (152)$$

где $k_2 \cdot L = L_e$ есть эффективная длина железа якоря за вычетом не только вентиляционных каналов, но и прослоек из бумаги. Коэффициент k_2 учитывает прослойки из бумаги и может быть принят равным от 0,95 до 0,85 в зависимости от толщины листов железа, бумаги и давления, с каким спрессован якорь. Часто принимают значение коэффициента k_2 равным:

	k_2
при толщине листов якорного железа в 0,5 *мм*	0,9
„ „ „ „ „ в 0,3 *мм*	0,85.

Разделим левую и правую часть равенства (151) на Q_z.

$$\frac{\Phi_t}{Q_z} = \frac{\Phi_z}{Q_z} + \frac{\Phi_m}{Q_z} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (153)$$

Левая часть равенства представляет собой некоторую теоретическую индукцию в зубцах, которая получилась бы, если бы весь поток Φ_z прошел только через железо зубца. Обозначим эту теоретическую индукцию в зубце через

$$B_{z\ теор} = \frac{\Phi_z}{Q_z} \quad \text{. . . . .} \quad (154)$$

Первый член правой части равенства представляет собой действительно получающуюся магнитную индукцию в зубце

$$B_{z\ действит} = \frac{\Phi_z}{Q_z} \quad \text{. . . . .} \quad (155)$$

Второй член в правой части равенства можно преобразовать следующим образом. Помножим и разделим этот член на Q_m — сечение впадины; тогда получим:

$$\frac{\Phi_m \cdot Q_m}{Q_m \cdot Q_z} = H \cdot k_3, \quad \text{. . . . .} \quad (156)$$

так как $\frac{\Phi_m}{Q_m}$ есть магнитная сила в воздухе — H, а через k_3 мы обозначаем соотношение $\frac{Q_m}{Q_z}$. Это соотношение может быть вычислено следующим образом:

$$k_3 = \frac{Q_m}{Q_z} = \frac{t_1 L_1 - zk_2 L}{z k_2 L} \quad \text{. . . . .} \quad (157)$$

Здесь мы к сечению впадины причисляем еще сечение, занятое изоляцией между листами и воздушными каналами, что является правильным, так как и эта часть сечения деления зубца участвует в проведении части магнитных линий.

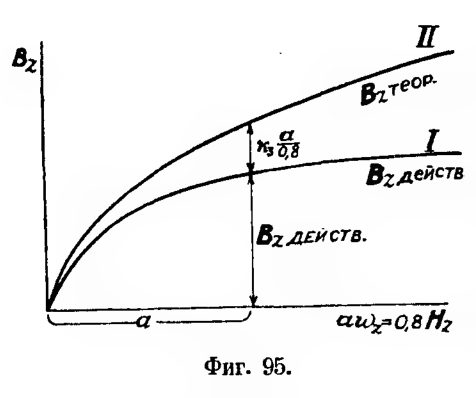
Таким образом можно написать, что

$$B_{z\ теор} = B_{z\ действит} + k_3 \cdot H \cdot \quad \text{. . . . .} \quad (158)$$

Так как $H = \frac{aw_z}{0{,}8}$, то означенное равенство можно переписать следующим образом:

$$B_{z\ теор} = B_{z\ действит} + k_3 \frac{aw_z}{0{,}8} \quad \text{. . . . .} \quad (159)$$

Из величин, входящих в это равенство, легко можно определить $B_{z\ теор}$ по геометрическим размерам зубцов и по известной нам магнитной индукции в воздухе B_l. С другой стороны, на основании экспериментально полученных кривых зависимости $B = f(aw)$ (см. фиг. 87) для якорного железа, известно соотношение между $B_{z\ действит}$ и aw_z. Коэффициент k_3 вычисляется ва основании известных геометрических размеров якоря и впадины. Неизвестно лишь непосредственное соотношение между $B_{z\ теор}$ и aw_z и, с другой стороны, не может быть сразу определена величина $B_{z\ действит}$.



Фиг. 95.

Для определения искомых aw_z по известной величине $B_{z\ теор}$ требуется предварительное построение вспомогательных кривых, дающих эту зависимость для различных величин k_3 и известного сорта железа [известного соонтошения $B_{z\ действит} = f(aw_z)$].

Построение ведем, задаваясь разными значениями (произвольными) величины aw и находя по опытной кривой соответствующие значения $B_{z\ действит}$. С другой стороны, для взятой величины k_3 вычисляем и величину $k_3 \dfrac{aw_z}{0,8}$. Прибавляя последнюю к найденному значению $B_{z\ действит}$ найдем величину $B_{z\ теор}$, соответствующую взятой величине aw. Таким образом по точкам можем найти полную кривую зависимости между aw_z и $B_{z\ теор}$ для определенного значения k_3.

Построение показано на фиг. 95 и ясно после изложенного.

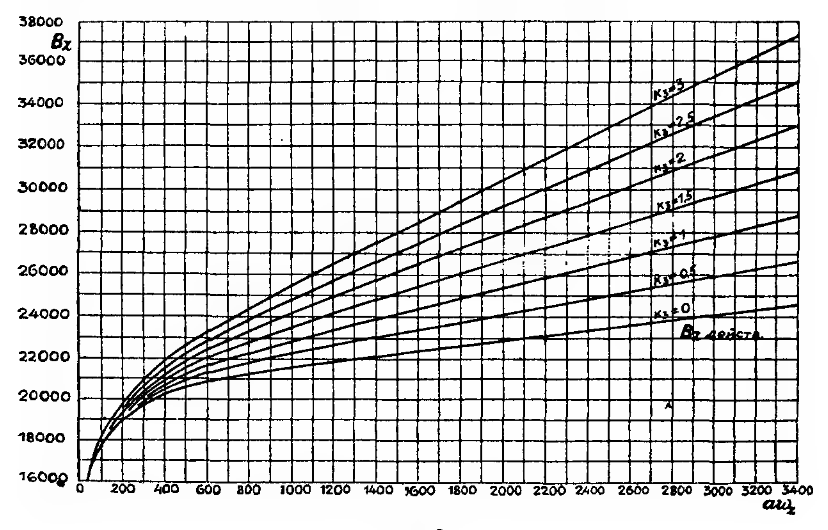
Полученные в результате таких построений кривые $B_{z\ теор} = f(aw)$ для различных значений k_3 и для некоторого определенного сорта якорного железа показаны на фиг. 96. По этим кривым уже непосредственно можно для данного значения $B_{z\ теор}$ найти соответствующую величину aw_z.

В случае, если магнитная индукция в зубцах получается меньше 18 000 линий, часто делают значительные упрощения

и считают, что все магнитные линии из полюса проходят только через зубцы якоря. Такое допущение возможно, так как при малых насыщениях железа проводимость зубцов настолько больше проводимости впадины, что магнитными линиями, ответвляющимися во впадину, можно пренебречь. В этом случае для определенного сечения зубца

$$B_{z\ действит} \lessapprox B_{z\ теор} = \frac{\Phi_t}{Q_z} = \frac{B_l \cdot t_1 \cdot L}{z \cdot k_2 \cdot L} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (160)$$

и соответствующие ампер-витки на 1 *см* aw_z мы найдем просто по опытной кривой $B_{z\ действит.} = f(aw_z)$ (фиг. 87).

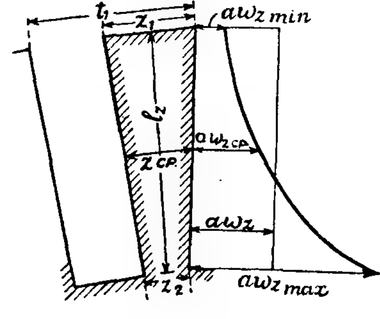


Фиг. 96.

Таким образом указанным методом мы можем найти ампервитки aw_z, потребные для прохождения магнитных линий через рабочий слой при длине пути в 1 *см*, если нам известно сечение рабочего слоя, перпендикулярное к направлению магнитных линий. При расчете общих ампер-витков AW_z, необходимых для прохождения магнитных потоков всего рабочего слоя (в двух местах, под двумя полюсами) по пути $2\,l_z$, получаются некоторые трудности вследствие того, что сечение зубцов обычно не остается постоянным по всей длине зубца l_z: к наружной поверхности якоря оно шире, к основанию зубца — уже (см. фиг. 97). Впадина обычно имеет постоянное сечение по всей глубине.

При таких условиях расчет суммарных $AW_з$ ведут следующим образом. Делят зубец поперечными сечениями на отдельные участки, через каждый сантиметр высоты зубца l_z, и по известным размерам диаметра якоря, зубцов и впадин определяют для каждого сечения шаг зубца t_x, ширину зубца z_x и ширину впадины $t_x - z_x$. Беря средние значения этих величин для каждого участка в 1 *см*, определяют уже известным способом потребные ампер-витки на 1 *см* длины пути по зубцам aw_z. Очевидно, для каждого участка потребные aw_z окажутся разными, при чем минимальными они будут у поверхности якоря и максимальными у основания зубца. Полученные значения ампер-витков aw_z для отдельных участков наносят на диаграмму (см. фиг. 98) в виде кривой в зависимости от высоты, на которой берется сечение зубца. Спланиметрировав полученную кривую значений aw_{zx}, полученную площадь делят на высоту зубца и получают среднее значение ампер-витков на 1 *см* — aw_z. Помножив aw_z на полную длину пути по рабочему слою $2 \cdot l_z$, получают полные потребные ампер-витки на весь путь по рабочему слою магнитной цепи (под двумя полюсами). Таким образом

Фиг. 97.



Фиг. 98.

$$AW_з = 2aw_z \cdot l_z \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (161)$$

В случае, если отношение максимальной ширины зубца z_{max} (на окружности якоря) к минимальной ширине зубца z_{min} (у основания зубца) не превосходит величины 1,5:

$$\frac{z_{max}}{z_{min}} < 1{,}5, \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (162)$$

возможно пользоваться приближенным методом Арнольда и вычислять среднее значение ампер-витков на 1 *см* пути по зубцам aw_z по правилу Симпсона:

$$aw_z = \frac{aw_{z\,min} + 4\,aw_{z\,cp} + aw_{z\,max}}{6}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (163)$$

для чего нужно рассчитать ампер-витки aw_{z_x} только для трех сечений зубца: минимального, максимального и среднего (см. фиг. 98).

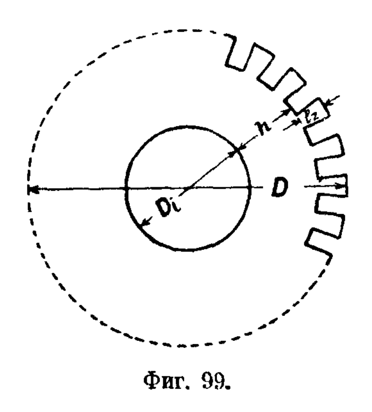
Суммарные ампер-витки попрежнему равны:

$$AW_z = 2\,aw_z \cdot l_z; \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (164)$$

при $\frac{z_{max}}{z_{min}} > 1{,}5$ рекомендуется точный просчет для участков через каждый сантиметр или полсантиметра.

4. Ампер-витки для железа якоря AW_a.

Для нахождения ампер-витков для железа якоря (см. фиг. 99), как мы сказали выше, служит соотношение $AW_a = aw_a \cdot l_a$, причем для нахождения aw_a пользуются опытными данными из кривой намагничивания взятого сорта железа $B = f\ (aw)$. Соответственную магнитную индукцию находят, зная магнитный поток Φ_a и сечение железа Q_a. При вычислении сечения железа Q_a необходимо взять эффективное значение сечения железа якоря за вычетом изоляционных прослоек. Таким образом для сечения Q_a получаем следующее выражение:



Фиг. 99.

$$Q_a = k_2\,L\,h, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (165)$$

где h есть высота железа якоря за вычетом высоты рабочего слоя (зубцов), а остальные величины (k_2 и L) те же, что мы имели при расчете ампер-витков для зубцов, т.-е. k_z = от 0,95 до 0,85. При расчете магнитной индукции необходимо учесть то

бстоятельство, что магнитный поток, выходящий из одного полюса, Φ по входе в якорь разделяется па две части, идущие в разные стороны. Таким образом при расчете потребных ампер-витков на одну магнитную цепь необходимо брать не полный магнитный поток, а половину, т.-е. $\frac{\Phi}{2}$.

$$B_a = \frac{\Phi/2}{Q_a} = \frac{\Phi}{2k_z Lh} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (166)$$

По этой величине находятся и ампер-витки

$$AW_a = aw_a l_a \quad \ldots \ldots \ldots \quad (167)$$

5. Ампер-витки для сердечников магнитов AW_m и ярма AW_j.

Нахождение этих величин не представляет никаких трудностей и происходит по указанным выше формулам. При вычислении лишь магнитной индукции в ярме необходимо помнить, что через каждый участок ярма проходит только половина магнитного потока, выходящего из полюсов. При расчете индукции в сердечниках магнитов конечно берется полный магнитный поток полюса.

6. Магнитное рассеяние.

Не весь магнитный поток, проходящий через полюс, проходит и через якорь и якорную обмотку. Часть магнитных линий ответвляется и замыкается помимо якоря (см. фиг. 100). Эти ответвляющиеся магнитные линии образуют так называемый магнитный поток рассеяния Φ_s.

Величину магнитного потока рассеяния обычно учитывают коэффициентом рассеяния σ, представляющим собой соотношение между полным потоком Φ, создающимся в сердечниках магнитов, и той его частью, — полезным магнитным потоком Φ_a, — которая проходит через якорь и его обмотку.

$$\sigma = \frac{\Phi}{\Phi_a} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (168)$$

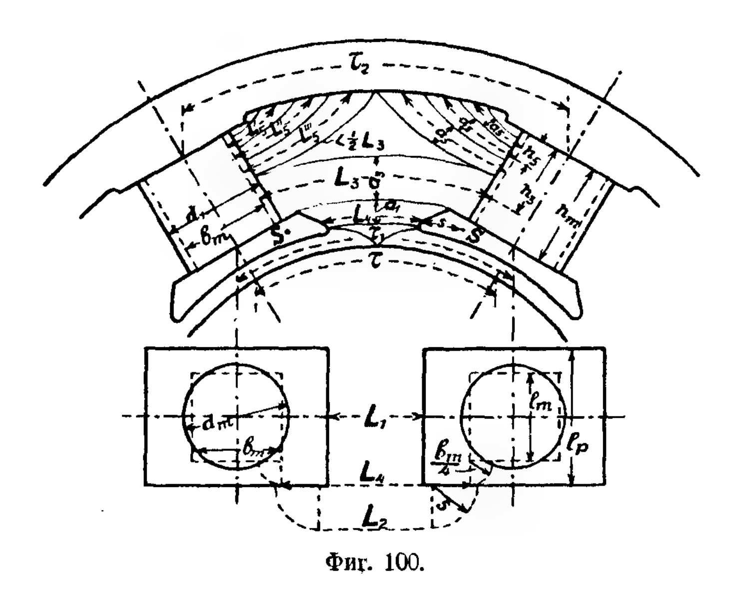
Полный магнитный поток Φ можно разложить на две составляющие Φ_a и Φ_s, где последняя составляющая и представляет собой поток рассеяния, замыкающийся помимо якоря.

Очевидно, что

$$\sigma = \frac{\Phi}{\Phi_a} = \frac{\Phi_a}{\Phi_a} + \frac{\Phi_s}{\Phi_a} = 1 + \frac{\Phi_s}{\Phi_a} \quad \ldots \ldots \ldots (169)$$

Отсюда ясно, что коэффициент рассеяния всегда больше единицы.

Так как обмотка якоря перерезывает лишь магнитные линии полезного потока Φ_a, то эл.-дв. сила машины определяется лишь этой частью общего потока.



Фиг. 100.

Следовательно для нахождения величины ампер-витков, необходимых для создания определенной величины эл.-дв. силы, нужно увеличить значение полезного магнитного потока, заданного величиной эл.-дв. силы, в отношении коэффициента рассеяния

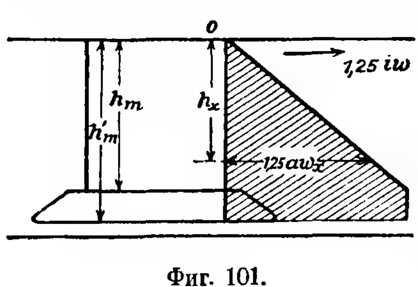
$$\Phi = \sigma \Phi_a \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (170)$$

Для этого значения потока и подбирается соответствующая величина ампер-витков возбуждения.

Из фиг. 100 видно, что магнитный поток рассеяния не весь полностью проходит по всей длине магнитов, часть магнитных линий рассеяния ответвляется ранее, пройдя лишь часть пути по сердечникам магнитов. Точно также не все магнитные линии

рассеяния проходят по всей длине ярма между двумя полюсами, часть замыкается, пройдя лишь часть полной длины соответствующего участка ярма l_j.

В силу большей величины магнитодвижущей силы у концов полюсов, на которых укреплены полюсные башмаки, можно сразу сказать, что главный поток рассеяния идет между концами полюсных сердечников и между поверхностями полюсных башмаков (см. расчет Φ_s дальше). В силу этого для расчета ампер-витков часто считают, что весь магнитный поток проходит через ярмо, а через магниты — две трети потока рассеяния. Для точного расчета величины потока рассеяния надо знать как полную величину ампер-витков обмотки магнитов, так и геометрические размеры всей магнитной системы и якоря. В силу этого обычно при расчете сначала выбирают значение коэффициента рассеяния σ на основании опытных данных, имеющихся для однотипных машин, а затем, когда уже расчет магнитной системы закончен, проверяют величину σ подсчетом. В нормальных машинах величина σ колеблется в пределах 1,1 — 1,3, и в отдельных случаях может выбираться на основании следующей таблицы (см. таблицу на стр. 121).



Фиг. 101.

Для расчета пользуются опять построением на глаз магнитных трубок потока рассеяния и вычислением их магнитной проводимости. Магнитодвижущая сила для каждой магнитной трубки определяется числом ампер-витков обмотки магнитов, сцепленных с этой трубкой (см. фиг. 100). Очевидно, магнитодвижущая сила у основания полюсов (где последние переходят в ярмо) равна нулю. Начиная от основания полюсов по направлению к полюсному башмаку магнитодвижущая сила растет, достигая максимума у верхней части полюсного башмака (где сердечник магнита переходит в полюсной башмак). При правильной цилиндрической форме катушек полюсов закон изменения магнитодвижущей силы от основания магнита до полюсного башмака может быть представлен прямой линией (см. фиг. 101). Весь путь магнитных линий рассеяния может быть разложен на три части: путь по железу магнитов, путь по ярму и путь по воздуху.

ТАБЛИЦА 3.

Коэффициент рассеяния σ.

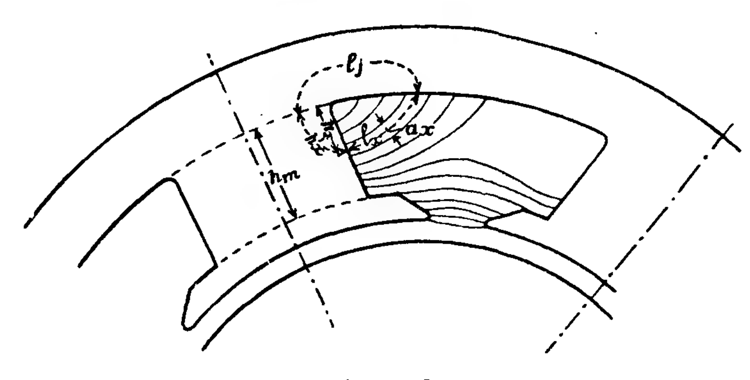
Мощность машины в киловаттах.

	1	5	10	100	500
	1,5	1,35	1,3	1,2	—
	1,6	1,5	1,4	1,3	—
	1,8	1,65	1,5	1,4	—
	1,3	1,25	1,2	1,15	—
	1,7	1,6	1,5	1,4	—
	1,3	1,25	1,2	1,15	1,12

Легко определяется та часть магнитодвижущей силы, которая затрачивается на прохождение магнитных линий каждой трубки потока рассеяния через железо магнитов и ярма, ибо здесь известны и общий магнитный поток в этих участках и сечение магнитопровода, а следовательно, известна в них магнитная ин-

дукция. Для имеющейся индукции по кривым (фиг. 87) находят ампер-витки на один сантиметр длины пути (aw), а отсюда и все ампер-витки на весь путь по железу магнитов и ярма.

Для нахождения магнитной индукции потока рассеяния в воздухе на рисунке (фиг. 100 и 102) наносят на глаз расположение магнитных трубок между рассеивающими поверхностями (на фиг. 100 не показано прохождение трубок внутри железа). При нанесении трубок имеют в виду, что часть магнитных линий



Фиг. 102.

замыкается по воздуху непосредственно между поверхностями полюсных башмаков и полюсных сердечников, часть же — между поверхностями полюсных сердечников и ярмом. Можно при этом считать, что магнитные линии, для которых $\frac{1}{2} L_3$ (см. фиг. 100) больше, чем L_5, переходят с магнитов прямо в ярмо. В случае, если сечение магнитных сердечников круглое, при расчетах потока рассеяния заменяют его равновеликим квадратным. Для того чтобы учесть поток рассеяния между лобовыми частями, вычерчивают магнитные линии и в другой проекции изображения магнитов (см. нижнюю проекцию на фиг. 100), при чем длина магнитных трубок L_2 меняется в соответствии с изменением длины трубки L_3.

При несколько упрощенном способе вычислений потока рассеяния делают допущение, что рассеивающими поверхностями являются только внутренние поверхности магнитов. Для учета же рассеивания лобовыми поверхностями, вместо длины l_m (см. фиг. 100)

внутренней рассеивающей поверхности магнита для расчета берут увеличенную длину

$$l'_m = l_m + 2\,l''_m, \qquad (171)$$

где l''_m принимают приближенно равной $\frac{1}{4} l_m$.

Ход расчета потока рассеяния Φ в этом случае получается следующий. Для какой-нибудь точки x внутренней поверхности магнита, находящейся на расстоянии $h_x = Ox$ от основания магнита, определяют величину магнитодвижущей силы 1,25 iw (см. фиг. 102). Рассчитывают потребные ампер-витки для прохождения этой трубки по железу магнитов и ярма:

$$AW'_{lm} = aw_m h'_x + aw_j \cdot l_j, \qquad (172)$$

где h'_x есть длина пути магнитной трубки по железу сердечника магнитов и l_j — длина пути трубки в железе ярма, aw_m и aw_j обозначают потребные ампер-витки на 1 *см* пути по сердечнику магнитов и по ярму.

Тогда магнитодвижущая сила, прогоняющая эту трубку по воздуху, будет равна:

$$1{,}25\,AW_{lx} = 1{,}25\,(iw - AW'_{lm}). \qquad (173)$$

Отсюда магнитный поток трубки, в предположении ширины ее в осевом направлении машины в l'_m *см* и средней ширины в перпендикулярной к оси плоскости a_x *см*, равен:

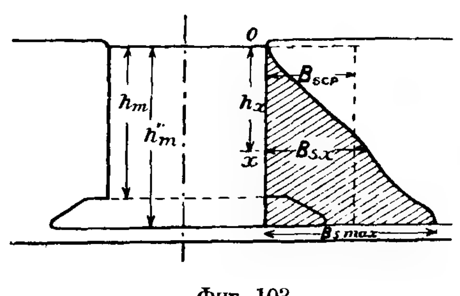
$$\Phi_{sk} = \frac{\text{М.-дв. с.}}{\text{магн. сопр.}} = \frac{1{,}25\,AW_{lx}}{\frac{l_x}{a_x l'_m}} = \frac{1{,}25\,AW_{lx} \cdot a_x \cdot l'_m}{l_x}. \qquad (174)$$

Если магнитную трубку взять в воздухе средним поперечным сечением в 1 *см*² ($a_x l'_m = 1$), то предыдущее выражение примет вид:

$$B_{sx} = \frac{1{,}25 \cdot AW_{lx}}{l_x}. \qquad (175)$$

Таким образом мы можем определить величину магнитной индукции в воздухе для всех точек рассеивающей поверхности магнита. Нанеся эти точки на диаграмме (фиг. 103), получим

кривую, представляющую изменение магнитной индукции B_{sx} в зависимости от расстояния данной точки (x) поверхности магнита от его основания (O). Спланиметрировав площадь кривой B_{sx} (на фиг. 103 заштрихована) и разделив на полную высоту магнита h'_m, найдем среднюю магнитную индукцию потока рассеяния в воздухе $B_{s\,cp}$.



Фиг. 103.

Расчет ведем на одну рассеивающую сторону одного полюса. В тех случаях, когда трубки потока рассеяния проходят от одного полюса к другому, берем половину длины трубки в воздухе $\left(\frac{L_1}{2}, \frac{L_2}{2}, \frac{L_3}{2}, \frac{L_4}{2}\right.$ — см. фиг. $\left.100\right)$ (и соответственно магн.-дв. силу только одного полюса).

Магнитный поток рассеяния одной рассеивающий стороны полюса Φ'_s получится, если мы среднюю магнитную индукцию $B_{s\,cp}$ помножим на рассеивающую поверхность одной стороны полюса (см. выше) $l'_m \cdot h'_m$.

$$\Phi'_s = B_{s\,cp} \cdot l'_m \cdot h'_m \quad \ldots\ldots\ldots (176)$$

Полный магнитный поток рассеяния одного полюса (с обеих сторон) равен:

$$\Phi_s = 2\,\Phi'_s = 2\,\Phi_{s\,cp} \cdot l'_m \cdot h'_m \quad \ldots\ldots\ldots (177)$$

Приблизительно коэффициент рассеяния можно определить по следующей эмпирической формуле:

$$\sigma = 1 + \frac{AW_{lza}}{B_l}\left(\frac{C_1}{\tau} + \frac{C_2}{L}\right), \quad \ldots\ldots (177')$$

где $AW_{lza} = AW_l + AW_z + AW_a$ — сумма ампер-витков для междужелезного пространства, зубцов и железа якоря (на одну магнитную цепь, состоящую из двух полюсов);

B_l — магнитная индукция в междужелезном пространстве;

τ — длина полюсного деления в *см*;

L — длина якоря без вентиляционных каналов в *см*;

C_1 и C_2 — постоянные, которые можно принять: при машинах с относительно большими полюсными делениями и короткими магнитными сердечниками

$$C_1 = 3{,}0 \text{ и } C_2 = 0{,}8$$

и при меньших полюсных делениях и более длинных магнитных сердечниках

$$C_1 = 3{,}5 \text{ и } C_2 = 1{,}0.$$

Когда известны только геометрические размеры машины, проф. К. И. Шенфер предлагает определять коэффициент рассеяния по следующей приближенной формуле:

$$\sigma = 1 + \delta \cdot \left(\frac{C_1}{\tau} + \frac{C_2}{L}\right), \quad \ldots \ldots \quad (177'')$$

где δ — междужелезное пространство в *см* и C_1 и C_2 — постоянные, которые в среднем можно принять C_1 = от 4 до 5 и C_2 = от 2 до 3.

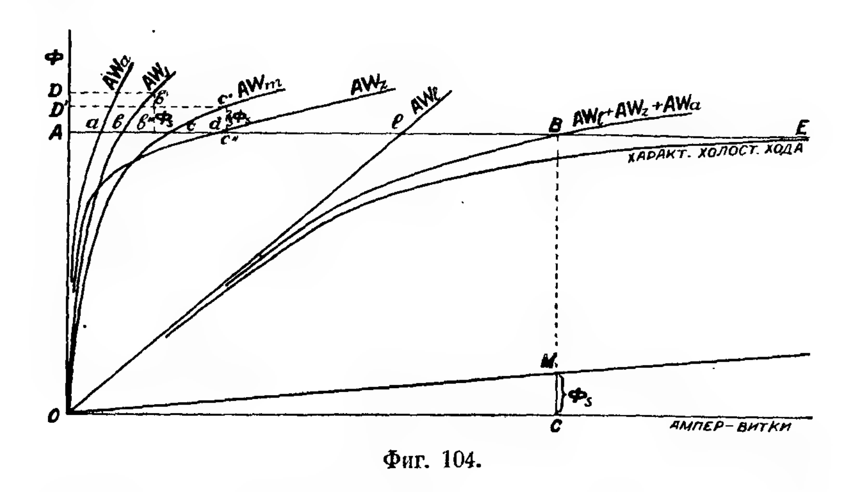
7. Определение суммарных ампер-витков обмотки магнитов при холостом ходе AW_0.

Зная ампер-витки, необходимые для прохождения магнитного потока Φ через отдельные участки магнитной цепи, и зная поток рассеяния, можно определить и суммарные ампер-витки, которые необходимо намотать на магниты, чтобы получить заданную эл.-дв. силу при холостом ходе. Задаваясь различными значениями эл.-дв. силы и определяя потребные для ее получения величины магнитного потока, можно найти соответствующие значения суммарных ампер-витков.

Отсюда можно построить целые кривые зависимостей $\Phi = f(AW)$ и $E_a = f(AW)$ при холостом ходе, т.-е. так называемые кривую намагничивания и характеристику холостого хода машины.

Суммарные ампер-витки AW_0 и кривую намагничивания машины $\Phi = f(AW_0)$ можно найти следующим образом.

На кривой (см. фиг. 104) наносим вычисленные величины потребных ампер-витков для отдельных участков магнитной цепи для различных значений магнитного потока Φ. Отдельно наносим кривую зависимости магнитного потока рассеяния Φ_s от ампер-витков возбуждения. Из изложенного о нахождении величины Φ_s явствует, что магнитный поток рассеяния определяется величиной $AW_{lza} = AW_l + AW_z + AW_a$ и пропорционален ей.



Фиг. 104.

Магнитное сопротивление воздуха, по которому идут линии магнитного рассеяния, — вторая величина, определяющая значение потока рассеяния, — определяется геометрическими размерами магнитной системы и вследствие постоянства магнитной проницаемости воздуха является для определенной машины величиной постоянной. Отсюда ясно, что зависимость $\Phi_s = f(AW_{lza})$ является прямолинейной. Просуммировав значения AW_l, AW_z, AW_a для различных значений Φ, получим кривую (см. фиг. 104) зависимости $\Phi = f(AW_{lza})$. Соответствующие этой кривой значения магнитного потока рассеяния получим, проведя прямую $\Phi_s = f(AW_{lza})$. Последнюю прямую наносим, определив Φ_s для какого-нибудь (например необходимого для создания нормального потока Φ) значения AW_{lza} и проведя прямую $\Phi_s = f(AW_{lza})$ через начало координат O и найденную точку M.

При построении результирующей кривой намагничивания нужно учесть еще то обстоятельство, что через магниты и ярмо проходит, кроме полезного потока Φ_0, еще поток рассеяния Φ_s

почему для этих частей магнитной цепи потребуется большее число ампер-витков, чем если бы через магниты и ярмо приходилось проводить только полезный поток Φ_0. Как мы видели выше, не все магнитные линии потока рассеяния проходят через всю длину полюсных сердечников, часть ответвляется через воздух, пройдя лишь часть длины магнитов. Так как, вследствие большей магнитодвижущей силы на концах полюсов, все же бо́льшая часть линий рассеяния проходит к концам полюсов, на которых укреплены полюсные башмаки, практически принимают для расчета (см. выше), что две трети полного потока рассеяния $\left(\frac{2}{3}\Phi_s\right)$ проходит через всю длину магнитов. Что касается ярма то, считают, что весь поток рассеяния полностью проходит через всю длину ярма между соседними полюсами.

Приняв изложенное во внимание, получим полное потребное число ампер-витков AW_0 для какого-нибудь значения полезного магнитного потока Φ_0, если к сумме ампер-витков $AW_a + AW_z + AW_l$, взятых для потока Φ_0, прибавим ампер-витки AW_m, взятые по кривой для потока $\Phi_0 + \frac{2}{3}\Phi_s$, и ампер-витки AW_j, взятые для потока $\Phi_0 + \Phi_s$. Если имеются стыки между сердечником полюса и ярмом, прибавляют еще ампер-витки $AW_{lm} = 2 \cdot 0{,}8\, B_m \delta_m$, взятые для потока $\Phi_0 + \Phi_s$. Таким образом для суммарных ампер-витков на фиг. 104 взяты не отрезки $\overline{Ab}$ и $\overline{Ac}$, а $\overline{Db'}$ и $\overline{Dc'}$, представляющие величины соответствующих AW_j и AW_m.

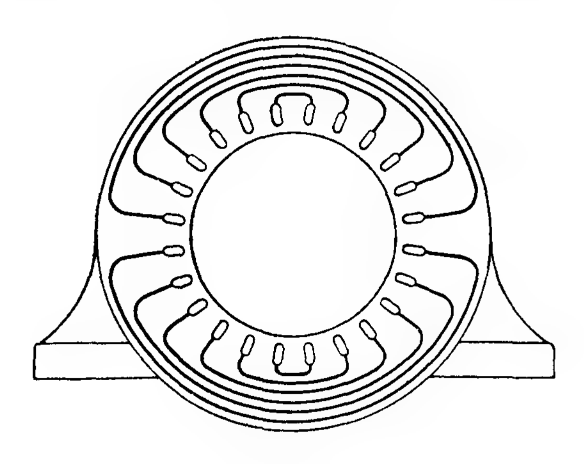
8. Равномерно распределенная обмотка возбуждения в машинах с неявно выраженными полюсами.

Не всегда магнитная система машин постоянного тока состоит из отдельных полюсов, на которые наматывается обмотка возбуждения, как это было предположено выше (машины с явно выраженными полюсами; см. например фиг. 100). Иногда обмотка возбуждения, подобно обмотке якоря, равномерно укладывается во впадинах на внутренней поверхности неподвижной части машины (статора). Схематическое изображение такой обмотки (машины с неявно выраженными полюсами, или, иначе,

машины с равномерно распределенной обмоткой возбуждения) показано на фиг. 105.

В этом случае обмотка возбуждения наматывается таким образом, чтобы по окружности статора получились чередующиеся между собой северные и южные полюса.

В отличие от обмотки с сосредоточенными проводниками возбуждения, в машинах с равномерно распределенной обмоткой возбуждения не все линии полезного магнитного потока сцеплены со всеми ампер-витками возбуждения. В силу расположения



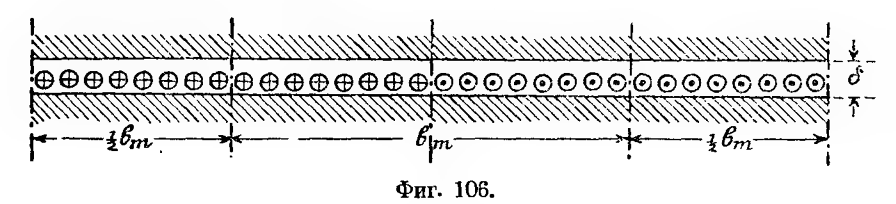
Фиг. 105.

обмотки возбуждения в машинах с явно выраженными полюсами магнитодвижущая сила этой обмотки постоянна под всей шириной полюса, а вместе с этим приблизительно постоянна и магнитная индукция. В машинах с неявно выраженными полюсами в силу указанного выше обстоятельства (не все магнитные линии полезного потока сцеплены со всеми витками обмотки возбуждения) магнитодвижущая сила обмотки возбуждения в различных точках статора в пределах одного полюса непостоянна, а также имеют разные значения и магнитная индукция.

Рассмотрим распределение по статору таких машин магн.-дв. силы и индукции.

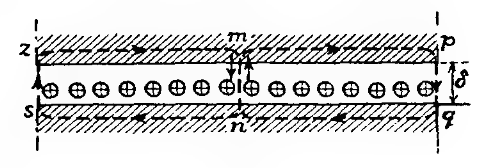
Схематически равномерно распределенную обмотку возбуждения в простейшем случае двухполюсной машины можно представить в виде ряда проводников, уложенных по поверхности статора между двумя железными поверхностями, отстоящими

друг от друга на одинаковом расстоянии δ *см* (фиг. 106). В одной половине проводников ток имеет одно направление, в другой — противоположное. Совокупность рядом лежащих проводников, составляющих половину всей обмотки, из которых, в свою очередь, половина имеет ток одного направления, а другая — ток обратного направления, на ширине b_m (см. фиг. 106), образует обмотку одного полюса, остальные относятся к обмотке второго полюса.



Фиг. 106.

Прежде всего посмотрим, чему равняется магн.-дв. сила и магнитная индукция в средней точке (по линии $\overline{mn}$) группы проводников, с током одного направления (см. фиг. 107). Магн.-дв. сила, действующая по направлению $\overline{mn}$, определяется ампер-стержнями, лежащими с правой и левой стороны от линии $\overline{mn}$. Если рассматривать действие ампер-стержней правой стороны, то магн.-дв. сила этой части проводов вызывает магнитный поток, проходящий по линии $\overline{mn}$ снизу вверх, от n к m. Наоборот, левая половина стержней вызывает магнитные линии, проходящие по линии $\overline{mn}$ сверху вниз, от m к n. В силу симметрии расположения правой и левой половин обмотки (фиг. 106) и равенства токов в стержнях той и другой части магн.-дв. силы, действующие по линии $\overline{mn}$, взаимно уравновешиваются, и магнитные потенциалы точек m и n оказываются равными между собой. Магнитная индукция по этой линии, пропорциональная результирующей магн.-дв. силе, равна нулю.

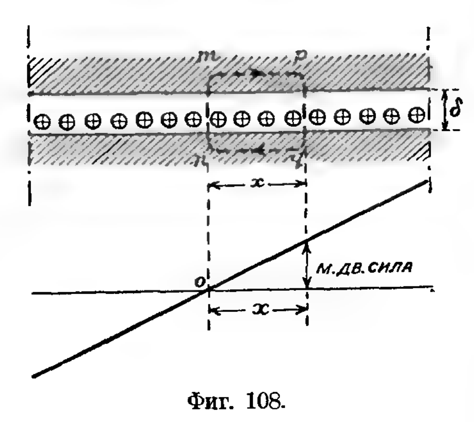


Фиг. 107.

Магн.-дв. силу во всякой другой точке междужелезного пространства, отстоящей на расстоянии x от средней оси $\overline{mn}$ (см. фиг. 108), определим следующим образом.

Выделим магнитную трубку $mpqn$. Магн.-дв. сила, действующая по замкнутой линии этой трубки, определяется объемом

тока в сцепленных с контуром трубки стержнях. Для нахождения объема тока, определяющего магн.-дв. силу трубки, вводим понятие „линейной нагрузки током" на 1 *см* длины окружности обмотки возбуждения, которую обозначаем через AS.



Фиг. 108.

Величина AS определяется в предположении совершенно равномерного распределения обмотки по окружности статора, причем все стержни или проволоки, имеющие одинаковое направление тока, предполагаются слитыми в один тонкий полуцилиндр одинаковой толщины, по которому идет ток с равномерным распределением плотности по всему сечению полуцилиндра (направление тока то же, что и в проводах действ тельной обмотки).

Очевидно:

$$AS = \frac{i_e N_l}{\pi D_e} \text{ ампер на 1 } см, \quad \ldots\ldots \quad (178)$$

где i_e — то в каждом проводе,

N_l — полное число проводов по окружности,

D_e — внутренний диаметр окружности статора.

Тогда объем тока сцепленных с трубкой *mpqn* проводов будет равен:

$$iw = x \cdot AS \quad \ldots\ldots \quad (179)$$

Отсюда магн.-дв. сила для трубки получится равной:

$$М.\text{-}дв.\ с. = 0{,}4\,\pi \cdot x \cdot AS \quad \ldots\ldots \quad (180)$$

Выше мы нашли, что магнитные потенциалы точек *m* и *n* равны между собой. Следовательно вся найденная нами магн.-дв. сила распределится лишь на два участка $\overline{mp}$ и $\overline{qn}$, идущие по железу, и один участок $\overline{pq}$, равный междужелезному пространству δ, проходящий по воздуху. В силу малого магнитного сопротивления железа по сравнению с воздухом сопротивлением участков $\overline{mp}$ и $\overline{qn}$ можно пренебречь и считать, что вся магн.-дв.

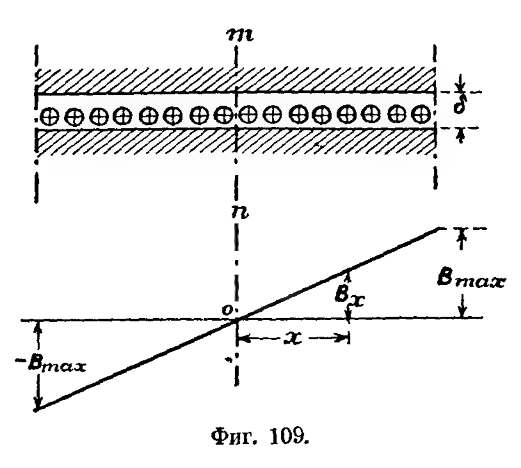
сила идет на преодоление сопротивления воздуха на участке $\overline{pq}$. Таким образом можно считать, что магн.-дв. сила по некоторой линии $\overline{pq}$, проходящей на расстоянии x от оси, $\overline{mn}$ определяется выражени м (180). Так как величина x в это выражение входит в первой степени и остальные величины постоянные, то распределение магн.-дв. силы показанной на фиг. 107 части обмотки возбуждения может быть представлено в виде прямой линии, проходящей через нулевое значение в точке, соответствующей оси $\overline{mn}$, как это показано на фиг. 108.

Магнитную индукцию для той же линии $\overline{pq}$ можно получить, имея в виду сделанные допущения, если представить себе взятую нами трубку в воздухе сечением в 1 $см^2$. Тогда:

$$B_x = \frac{0{,}4\pi x \cdot AS}{\delta\ см} \quad \text{. . . . .} \quad (181)$$

Распределение по окружности магнитной индукции, следовательно, также может быть представлено в виде прямой линии (см. фиг. 109). Для любой точки вне расположения проводов обмотки возбуждения значение магнитной индукции будет постоянное: B_{max} или $-B_{max}$. При соответствующем выборе масштаба обе зависимости:

М.-дв. с. $= f(x)$ и $B_x = f(x)$ могут быть предоставлены одной и той же прямой.



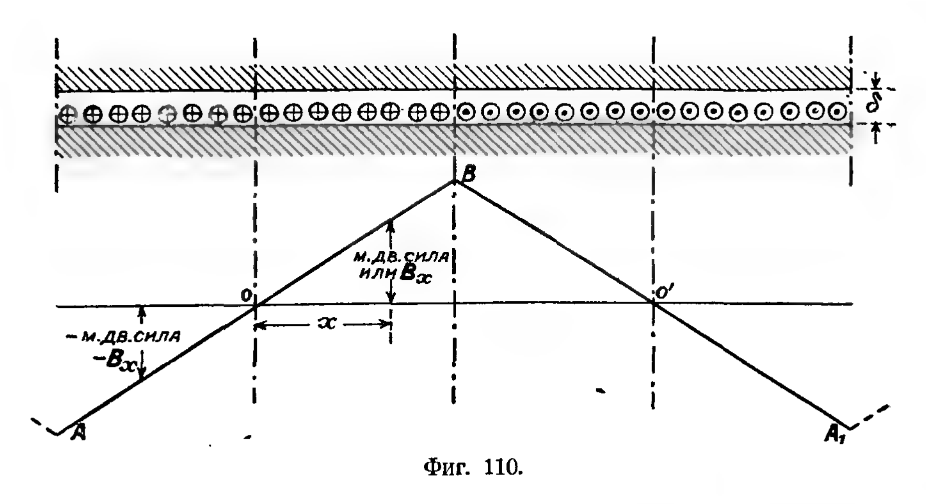
Фиг. 109.

Нетрудно найти, что для полного числа проводов обмотки двухполюсной машины, показанной на фиг. 106, распределение магн.-дв. силы и индукции (одна кривая при соответствующем подборе масштабов) представится в следующем виде (см. фиг. 110): Таким образом кривая поля здесь имеет треугольную форму.

Магнитный поток, выходящий из одного такого полюса, можно получить, спланиметрировав площадь такого треугольника OBO', найдя среднюю магнитную индукцию $B_{l\,cp}$ и помножив ее на полную поверхность полюса, из которого поток выходит.

9. Реакция якоря и определение размагничивающих и поперечно-намагничивающих ампер-витков реакции якоря.

До сих пор мы представляли себе, что машина не нагружена, по якорю никакого тока не идет, и в машине проходят лишь магнитные линии потока, создаваемого обмоткой возбуждения магнитов. Когда машина начинает работать с нагрузкой, по обмотке якоря начинает итти ток. Ток, проходя по проводам обмотки якоря, создает около этих проводов свой собственный



Фиг. 110.

магнитный поток (см. фиг. 111) — поток реакции якоря. Этот поток, суммируясь с потоком (главным потоком), создаваемым обмоткой возбуждения магнитов (см. фиг. 112), вызывает искажение основного поля магнитов (см. фиг. 113).

Результатом искажения главного магнитного поля является:

1. Смещение физической нейтрали mm' [1]) на угол α против положения геометрической нейтрали nn' [1]) (служившей и физической нейтралью при холостом ходе машины). В генераторе это смещение происходит по часовой стрелке, в двигателе — против часовой стрелки. Смещение физической нейтрали связано с ослаблением одной стороны полюса и усилением другой сто-

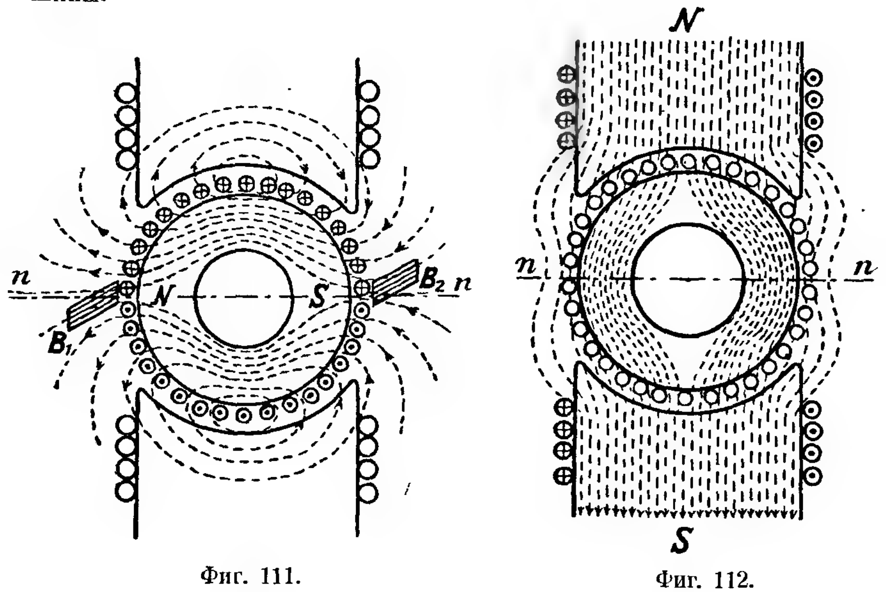
---

[1]) Геометрическая нейтраль — прямая, проходящая через ось якоря и перпендикулярная оси полюсов машины. Физическая нейтраль — прямая, также проходящая через ось якоря, но перпендикулярная направлению магнитных линий в якоре.

роны того же полюса (см. фиг. 113). В генераторе поле на набегающей стороне полюса ослабляется, а на сбегающей усиливается, в двигателе — наоборот.

2. В общем случае происходит ослабление главного магнитного потока, вследствие чего в генераторе получается падение напряжения, а в двигателе — увеличение числа оборотов.

3. Увеличение рассеяния главного магнитного потока машины.

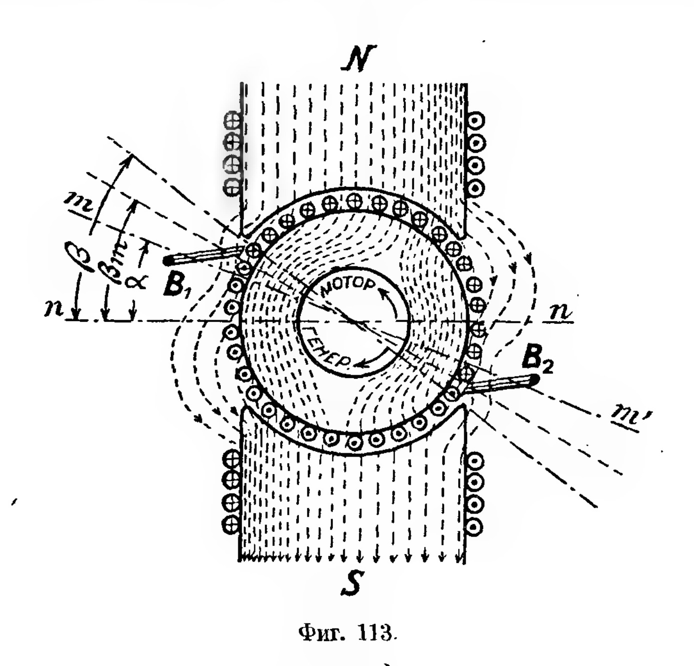


Фиг. 111. Фиг. 112.

Совокупность этих действий тока в якоре и называется реакцией якоря.

В случае сдвига щеток с геометрической нейтрали (обычно в сторону сдвига физической нейтрали) все проводники обмотки якоря можно разбить на две группы, разделенные линиями: одной, проходящей через щетки, и другой — ей симметричной (см. фиг. 114). Одна группа, соединенная горизонтальными линиями, как это видно из чертежа, создает магнитный поток, направленный по оси полюсов — продольный поток Φ_g. Нетрудно видеть, что при сдвиге щеток с геометрической нейтрали (в генераторе по направлению вращения, а в двигателе против направления вращения) продольный поток реакции якоря направлен навстречу главному магнитному потоку и уменьшает его. Поэтому эти ампер-витки реакции якоря носят название

размагничивающих ампер-витков AW_g. Результатом их действия является падение напряжения в генераторе и увеличение числа оборотов в двигателе, о чем мы уже говорили выше. Если сдвинуть щетки в противоположном направлении: в генераторе против направления вращения машины, а в двигателе — по направлению вращения, мы получим усиливающее действие продольного потока реакции якоря, который в этом случае складывался бы с главным магнитным потоком. Результат: повышение



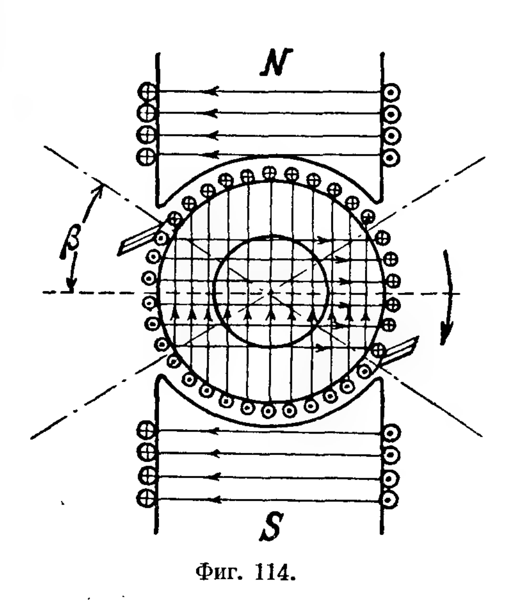
Фиг. 113.

напряжения генератора — компаундирование машины и уменьшение числа оборотов в двигателе. Как мы увидим дальше, по условиям коммутации машины сдвиг щеток в этом направлении (в генераторе против направления вращения) обычно невозможен.

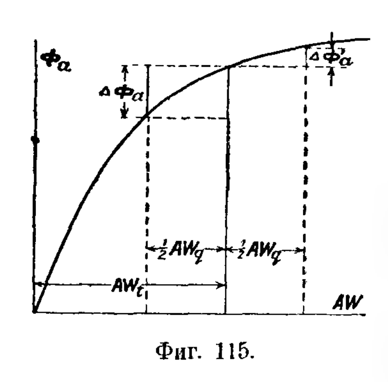
Другая группа проводников, соединенная на чертеже вертикальными линиями, образует поперечно-намагничивающие ампер-витки AW_q, создающие поперечный магнитный поток реакции якоря Φ_q.

Этот поток вызывает искажение главного магнитного потока, ослабляя в генераторе магнитную индукцию на набегающем конце и усиливая на сбегающем (в двигателе — наоборот).

Если бы не сказывалось насыщение железа при намагничивании и последнее изменялось в прямолинейной зависимости от возбуждающих ампер-витков, то действие искажения поля под влиянием реакции якоря не сказалось бы на общей величине магнитного потока машины и вместе с тем и на напряжении генератора. В этом случае — насколько ослабевает одна половина полюса, настолько же усиливается другая. При заметном насыщении железа ослабление магнитного потока в одной половине полюсов сказывается сильнее, чем усиление в другой (см. фиг. 115). В результате под влиянием поперечно-намагничивающих ампер-витков реакции якоря происходит добавочное ослабление главного магнитного потока и добавочное падение напряжения в генераторе.



Фиг. 114.



Фиг. 115.

Продольные и поперечные ампер-витки реакции якоря AW_g и AW_q можно определить следующим образом.

Введем, аналогично тому что мы сделали при рассмотрении равномерно распределенной обмотки возбуждения, и здесь понятие о линейной нагрузке током на 1 *см* длины окружности якоря:

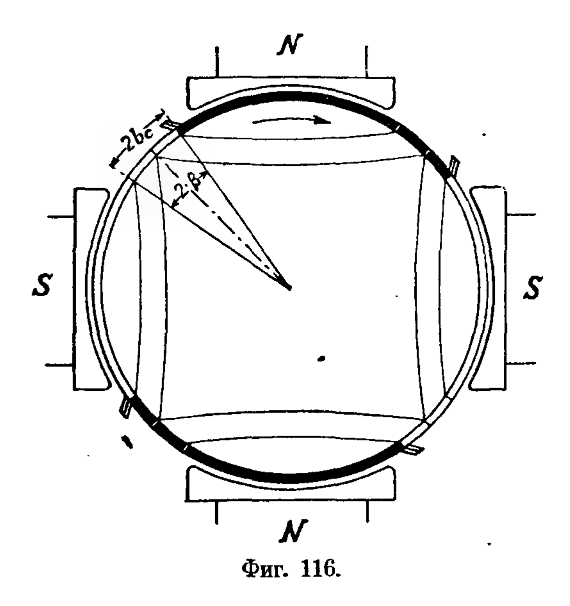
$$AS = \frac{N_a \cdot i_a}{\pi D_a}, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (182)$$

где N_a — общее число проводников обмотки якоря,

i_a — ток в одной параллельной цепи якоря, или, что то же, ток в каждом проводнике,

D_a — диаметр якоря в *см.*

При сдвиге щеток от геометрической нейтрали на угол β (см. фиг. 113, а также схематическую фиг. 116) проводники обмотки, образующие размагничивающие ампер-витки AW_g, рас-



Фиг. 116.

положатся в каждом междуполюсном пространстве по дуге $2b_c$, охватывающей центральный угол 2β.

Численно эти ампер-витки дадут объем тока, равный:

$$AW_g = 2b_c \cdot AS \quad \ldots\ldots\ldots \quad (183)$$

на одну магнитную цепь. Величина AW_g может быть выражена и через центральный угол 2β, а именно:

$$AW_g = 2b_c \cdot AS = \frac{2\beta^\circ_{геом}}{360^\circ_{геом}} \cdot \pi D_{як} \cdot AS, \quad \ldots \quad (184)$$

где $\beta^\circ_{геом}$ — геометрический угол сдвига щеток с нейтрали.

Аналогично этому поперечно-намагничивающие ампер-витки

$$AW_q = (\tau - 2b_c) AS = \frac{\dfrac{180^\circ_{эл}}{p} - 2\beta^\circ_{геом}}{360^\circ_{геом}} \cdot \pi D_{як} \cdot AS \quad (185)$$

Для того чтобы компенсировать размагничивающее действие ампер-витков реакции якоря AW_g, необходимо ампер-витки AW_0, рассчитанные для определенной эл.-дв. силы, увеличить на величину

$$\sigma \cdot AW_g, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (186)$$

где σ есть коэффициент рассеяния главного магнитного потока.

Хотя непосредственно поперечно-намагничивающие ампер-витки AW_q и не действуют размагничивающим образом на главный магнитный поток, но все же, как мы указывали выше, вследствие насыщения железа, уменьшение магнитного потока под влиянием поперечно-намагничивающих ампер-витков реакции якоря в одной половине полюса не компенсируется усилением потока в другой половине. Для компенсации ослабления главного потока вследствие этой причины приходится также несколько увеличивать число ампер-витков обмотки магнитов. Для определения числа суммарных витков некоторые авторы предлагают складывать полученные суммарные ампер-витки обмотки возбуждения $AW_t' = AW_0 + \sigma AW_g$ с AW_q геометрически, что дает:

$$AW_t = \sqrt{(AW_0 + \sigma AW_g)^2 + AW_q^2} \quad \ldots \quad (187)$$

При этом иногда учитывают рассеяние поперечного потока рассеяния Φ_q. Так как этот поток (Φ_q) дважды проходит междужелезное пространство, то величина рассеяния должна быть значительна. Поэтому в вышенаписанное выражение вместо AW_q подставляют $\frac{AW_q}{\sigma^2}$, что, при $\sigma = 1{,}2$, даст примерно:

$$\frac{AW_q}{\sigma^2} = \frac{AW_q}{1{,}2^2} = 0{,}7\, AW_q, \quad \ldots \ldots \quad (188)$$

и выражение (187) примет вид:

$$AW_t = \sqrt{(AW_0 + \sigma AW_g)^2 + 0{,}5 \cdot AW_q^2}, \quad \ldots \quad (189)$$

так как $0{,}7^2 \backsimeq 0{,}5$.

Иногда, вместо только что описанного способа для компенсации размагничивающего действия поперечно-намагничивающих ампер-витков AW_q, к определенным выше суммарным ампер-виткам $AW_t' = \sigma AW_g$ прибавляют алгебраически $0{,}33 \cdot AW_q$. Тогда:

$$AW_t = AW_t' + \sigma \cdot AW_g + 0{,}33 \cdot AW_q \quad \ldots \quad (190)$$

10. Результирующие ампер-витки при нагрузке AW_t.

Результирующие ампер-витки при нагрузке получатся как сумма:

$$AW_t = AW_{a_b} + AW_{z_b} + AW_{l_b} + AW_{m_b} + AW_{j_b} + \\ + \sigma \cdot AW_g + AW_q, \quad \dots \dots \dots \quad (191)$$

при чем при определении AW_{m_b} и AW_{j_b} должен быть учтен коэффициент рассеяния при нагрузке, равный:

$$\sigma_b = 1 + \frac{2 \cdot 1{,}25 (AW_{a_b} + AW_{z_b} + AW_{l_b} + \sigma AW_g + AW_q') \Sigma\lambda}{\Phi_b}, \quad (192)$$

где $\Sigma\lambda$ — сумма проводимостей — имеет то же значение, что и при холостом ходе, $AW_q' = 0{,}33\, AW_q$, если влияние поперечно-намагничивающей реакции не учтено другим способом, например указанным выше (см. ф-лы 187 и 189).

Поток рассеяния при нагрузке, как мы уже говорили выше, вследствие реакции якоря увеличивается. Увеличение коэффициента рассеяния при нагрузке равно от 2 до 5% от значения его при холостом ходе.

Равным образом при нахождении суммарных ампер-витков возбуждения при нагрузке необходимо учесть то обстоятельство, что и полезный поток, пронизывающий якорь, должен быть больше, чем при холостом ходе:

$$\Phi_b = \frac{a}{N} \cdot \frac{60}{pn} E_a \, 10^8 \text{ вольт}, \quad \dots \dots \quad (193)$$

при чем эл.-дв. сила E_a, которая должна быть создана в обмотке якоря, определяется выражением:

$$E_a = E_k \pm I_a (R_a + R_s) \pm 2\Delta P, \quad \dots \dots \quad (194)$$

где R_a — сопротивление обмотки якоря,

R_s — сопротивление сериесной обмотки в случае компаундной машины,

ΔP — падение напряжения в переходном слое между щеткой и коллектором,

Знаки + относятся к генератору, — к двигателю.

11. Точная проверка числа ампер-витков при нагрузке.

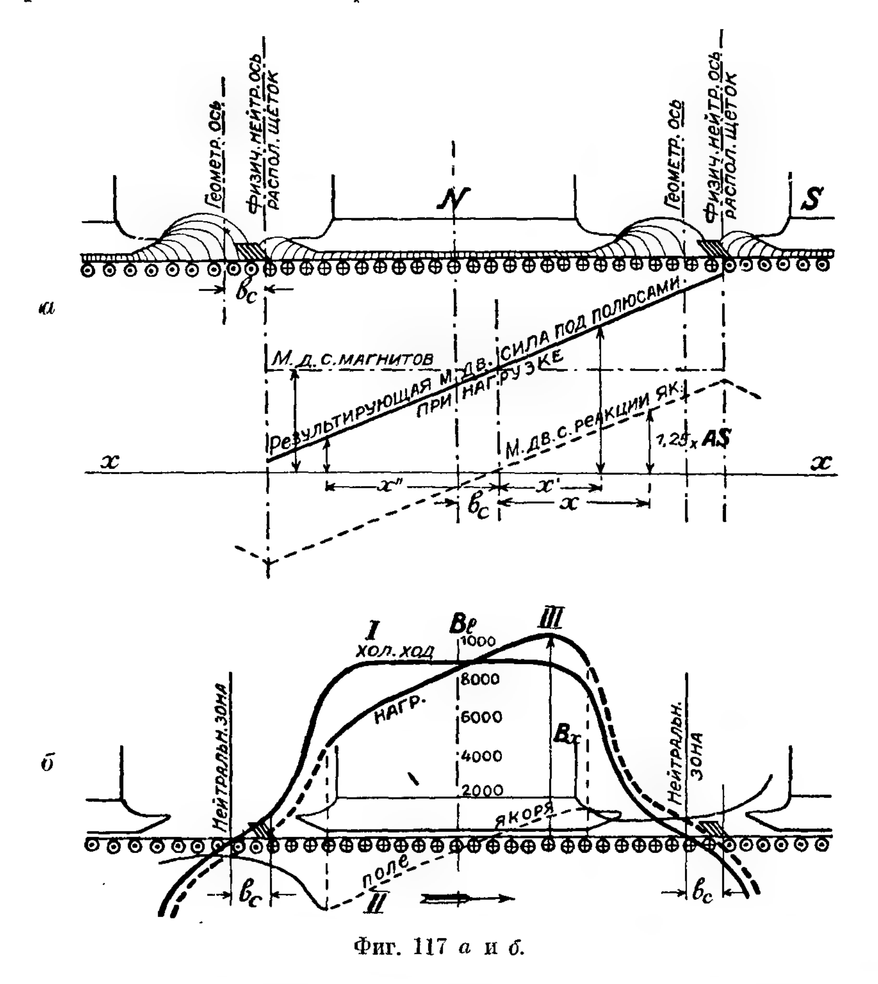
Приведенные выше расчеты ампер-витков возбуждения, учитывающие действие реакции якоря, являются приближенными, особенно вследствие приближенности подсчета AW_q'. Точный способ учета действия реакции якоря основан на определении картины распределения результирующей магнитодвижущей силы по окружности якоря и на нахождении по расположению магнитных трубок под полюсами распределения по окружности якоря магнитной индукции.

Распределение по окружности якоря магнитодвижущей силы найти легко, имея в виду, что магнитодвижущая сила под главными полюсами везде постоянна, при нагрузке же к ней добавляется магнитодвижущая сила обмотки якоря, имеющая треугольную форму распределения (см. распределение магнитодвижущей силы равномерно распределенной обмотки). Вычерчивая распределение магнитных трубок между полюсом и якорем, определяем их проводимость. Зная же магнитодвижущую силу и проводимость для каждой точки, аналогично расчету потока рассеяния (см. выше) найдем картину распределения поля под полюсами при холостом ходе и при нагрузке. Распределение магнитодвижущей силы и магнитной индукции под полюсами показано на фиг. 117, *а* и *б*. Площадь кривой распределения магнитной индукции (кривая III на фиг. 117,б) является мерой полезного магнитного потока Φ_b при нагрузке. Равным образом площадь кривой I той же фигуры является мерой потока в якоре Φ_a при холостом ходе. Если обе кривые построены для одной и той же магнитодвижущей силы обмотки магнитов (соответствующей магнитному потоку Φ_b при нагрузке, как в нашем случае), то разность площадей магнитных полей при нагрузке и без нагрузки определит влияние на магнитный поток поля реакции якоря. На рисунке в фиг. 117 нанесена также кривая поля холостого хода (I). Разность кривых III (поле при нагрузке) и I дает кривую поля якоря (II). Соответствующие магнитные потоки на один полюс получим, помножив площади кривых полей (I, II и III) на длину якоря L.

Такими построениями мы можем наиболее точно проверить величину полезного магнитного потока Φ_b в якоре, определенную нами предварительно одним из приближенных методов.

Проверка потока Φ_b определит нам также правильность взятых нами общих ампер-витков обмотки магнитов AW_t.

Поле реакции якоря, как мы говорили уже ранее, может быть разложено на два поля: продольное и поперечное. Такое разложение показано на фиг. 118.



Фиг. 117 *а* и *б*.

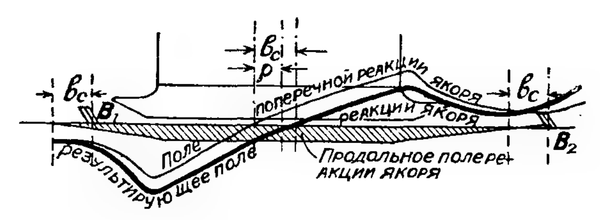
Из кривой распределения магнитной индукции, определенной для эл.-дв. силы холостого хода E_0 (при полезном магнитном потоке Φ_a) можно найти так называемую теоретическую ширину полюсной дуги b_t.

Определяем указанным выше способом кривую холостого хода (для E_0) (см. фиг. 119). Тогда площадь этой кривой, как мы

сказали, будет служить мерой магнитного потока в якоре Φ_a при холостом ходе.

Эта площадь эквивалентна площади прямоугольника с той же высотой B_l и шириной, равной b_i. Тогда полный поток, входящий в якорь Φ_a при холостом ходе, будет равен:

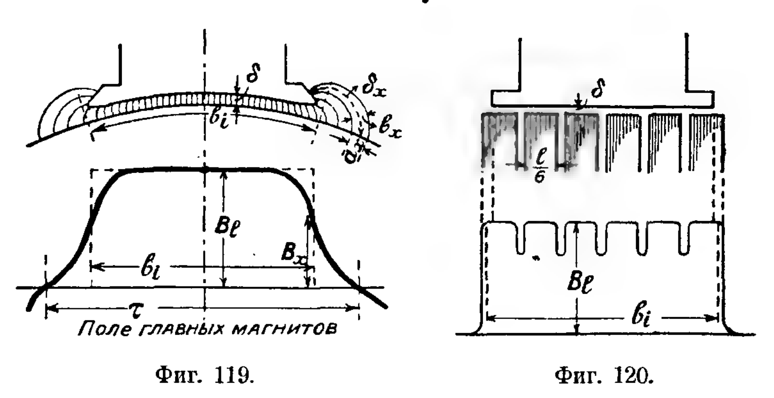
$$\Phi_a = b_i L B_l \quad (195)$$



Фиг. 118.

где L — длина якоря (без вентиляционных каналов), а B_l — максимальная индукция в междужелезном пространстве под полюсом. Величина, дающая отношение длины теоретической полюсной дуги b_i к полюсному делению τ (обе величины по длине окружности якоря)

$$a_i = \frac{b_i}{\tau}, \quad (196)$$



Фиг. 119. Фиг. 120.

называется теоретическим коэффициентом заполнения и берется обычно равной:

в машинах без дополнительных полюсов около 0,65—0,75,

„ с дополнительным полюсом около 0,5—0,7.

Конечно расхождение магнитных линий при переходе в якорь может быть аналогичным образом учтено и в осевом направлении машины (см. фиг. 120). Но в силу того, что магнитные

линии, входящие в якорь со стороны лобовых частей и в вентиляционные каналы, вызывают в этих частях токи Фуко, а эти токи, действуя обратно, уменьшают потоки, входящие с лобовых сторон и со стороны вентиляционных каналов весьма сильно, то этими добавочными потоками (лобовых частей и вентиляционных каналов) практически можно пренебречь. Поэтому для всех расчетов магнитных потоков за полезную длину якоря можно принять длину, равную длине пакетов железа без вентиляционных каналов, т.-е. положить:

$$l_i = L, \quad (197)$$

что мы всегда и делали.

ГЛАВА ПЯТАЯ.

КОММУТАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА.

1. Определение процесса коммутации.

Как мы отмечали уже раньше, при вращении машины отдельные элементы обмотки переходят из одной параллельной цепи во вторую, далее — в третью (если число параллельных цепей в обмотке машины более двух), и т. д. Затем, обойдя последовательно все параллельные цепи, каждый элемент снова попадает в число элементов первой параллельной цепи обмотки, после чего снова повторяется переход взятого элемента из одной цепи в другую. Переход элемента из одвой параллельной цепи в следующую совершается тогда, когда коллекторные пластины, к которым присоединены концы нашего элемента, проходят под щетками, отводящими или подводящими ток из машины во внешнюю сеть или обратно из сети в машину. Для того чтобы возможно полнее использовать одинаково направленные индуктированные в проводниках эл.-дв. силы для получения нужного нам от машины напряжения, стремятся расположить щетки так, чтобы переход элементов из одной параллельной цепи в другую происходил тогда, когда элементы проходят по возможности близко от физической нейтрали машины.

Так как направления индуктированных токов в двух последовательных по ходу обмотки параллельных цепях противоположны друг другу, то при переходе элемента из одной параллельной цепи в следующую направление протекающего по элементу тока должно измениться на обратное.

Далее, так как около всякого проводника, в котором протекает некоторый ток, образуется магнитное поле (поле рассеяния), то, очевидно, при изменении тока в рассматриваемом нами эле-

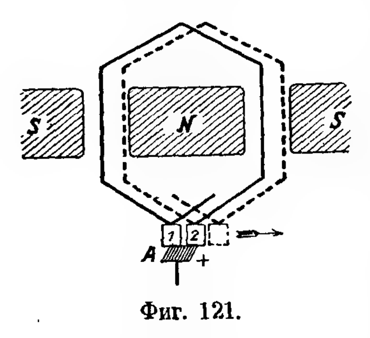
менте, в последнем должно проявиться действие эл.-дв. силы самоиндукции

$$e_s = -L\frac{di}{dt} \qquad (198)$$

Эта эл.-дв. сила самоиндукции стремится задержать процесс изменения тока в элементе при переходе его в другую параллельную цепь. Действие эл.-дв. силы самоиндукции, как это видно из выражения (198), скажется тем сильнее, чем быстрее произойдет изменение величины силы тока в нашем элементе.

Изменение тока в элементе, переходящем из одной параллельной цепи в другую (будем называть этот элемент „коммутируемым" элементом), происходит не мгновенно, а в течение некоторого времени ($T_{сек}$). Это время, очевидно, будет зависеть от продолжительности того момента, в течение которого щетка будет касаться коллекторных пластин, замыкающих концы коммутируемого элемента.

Так как щетки, во избежание разрыва соединения обмотки якоря с внешней цепью (во избежание искрения при этом), делаются всегда шире величины изоляционной прослойки между соседними коллекторными пластинами и обычно не уже ширины коллекторной пластины, то, очевидно, коммутируемый элемевт при проходе под щеткой на некоторый момент времени будет замкнут щеткой на короткое (см. фиг. 121).



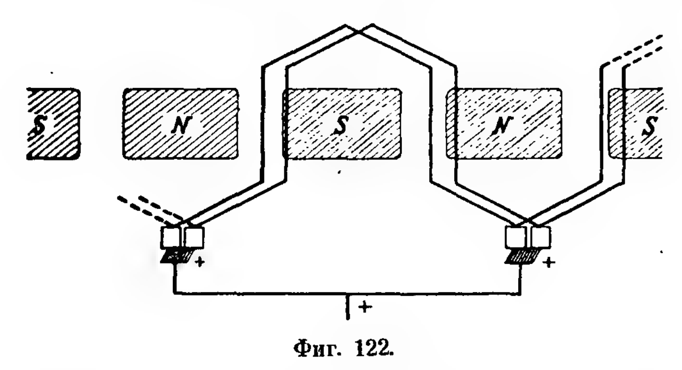
Фиг. 121.

В простейшем случае при петлевой обмотке это короткое замыкание производится одной щеткой. В случае волновой обмотки короткое замыкание может происходить и при помощи двух связанных между собой одноименных щеток (см. фиг. 122).

Для избежания искрения при коротком замыкании и переходе щетки с одной коллекторной пластины на другую необходимо, чтобы за время короткого замыкания (время соприкосновения щетки с коллекторными пластинами, на которых кончаются края коммутируемого элемента) ток в коротко замкнутом элементе успел изменить свое направление на обратное и достичь величины, равной току в той параллельной цепи, в которую элемент

вступает. Так как эл.-дв. сила самоиндукции задерживает изменение тока в коммутируемом элементе, то, как мы увидим далее, для получения безыскровой работы машины необходимо эту эл.-дв. силу скомпенсировать другой эл.-дв. силой, равной ей и направленной в противоположную сторону.

Компенсация эл.-дв. силы самоиндукции в коммутируемом элементе может производиться двумя способами: или сдвигом щеток или без сдвига щеток при помощи дополнительных полюсов. В первом случае щетки сдвигаются с таким расчетом, чтобы коммутируемый элемент во время коммутации находился в поле такой полярности и силы, которое индуктировало бы в нашем элементе эл.-дв. силу (будем называть эту эл.-дв. силу эл.-дв. силой внешнего поля), направленную против эл.-дв. силы самоиндукции и равную



Фиг. 122.

ей по величине. При втором способе компенсация эл.-дв. сила самоиндукции производится без сдвига щеток с геометрической нейтрали при помощи особых дополнительных полюсов, расположенных в зоне коммутации и создающих в коммутируемом элементе необходимую для компенсации эл.-дв. силы самоиндукции вспомогательную эл.-дв. силу.

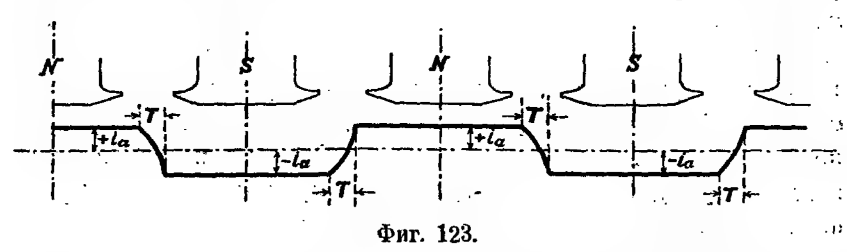
В дальнейшем, говоря о коммутации, мы под последней будем подразумевать процесс перехода элемента из одной параллельной цепи в другую, связанный с процессом изменения тока в коммутируемом элементе на обратный.

Зоной коммутации мы будем называть ту часть магнитного поля (по окружности якоря), при проходе которой происходит коммутирование тока в элементе или элементах (в случае, если коммутация происходит одновременно в нескольких элементах).

Под периодом коммутации ($T_{сек}$) мы будем подразумевать промежуток времени, в течение которого в коммутируемой катушке

ток изменяется на обратную величину. Очевидно, это время равно тому, которое пройдет с момента, когда край щетки *А* (см. фиг. 121) начнет находить на коллекторную пластину I, до момента, когда щетка сойдет с коллекторной пластины II.

Весь процесс изменения величины и направления тока, протекающего по какой-нибудь катушке за полный оборот машины,



Фиг. 123.

может быть представлен в виде некоторой кривой (см. фиг. 123), показывающей изменение направления тока в одной из катушек четырехполюсной машины.

2. Первый случай коммутации.

Рассмотрим процесс коммутации в простейшем случае. Предположим, что ширина щетки ($b_{щ}$) равняется ширине коллекторной пластины ($t_к$)

$$b_{щ} = t_к,$$

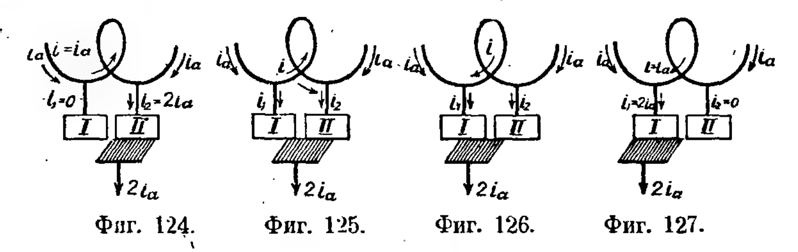
при чем ширину изоляционного слоя между соседними коллекторными пластинами считаем бесконечно малой. Далее, для упрощения считаем, что процесс коммутации происходит чрезвычайно медленно (скорость вращения якоря бесконечно мала) и величиной эл.-дв. силы самоиндукции в коммутируемой катушке поэтому можно пренебречь.

Предполагаем, что в момент коммутации коротко замкнутая катушка располагается строго по физической нейтрали и поэтому в ней в это время внешнее поле не индуктирует никаких эл.-дв. сил. Наконец допускаем, что сопротивление как самой короткозамкнутой катушки, так и проводников, соединяющих ее с коллекторными пластинами, настолько мало, что им можно пренебречь. Таким образом в этом случае при процессе коммутации учитываем лишь влияние сопротивлений переходного слоя между коллекторными пластинами и щеткой.

Изображая коммутируемую катушку (элемент) схематически в виде некоторого витка, мы получим следующие последователь-

ные моменты в коммутации (см. фиг. 124, 125, 126 и 127), соответствующие началу коммутации, двум промежуточным моментам и концу коммутационного периода.

Рассматривая некоторый промежуточный момент (см. фиг. 128), мы видим, что щетка все время отводит во внешнюю сеть один



Фиг. 124. Фиг. 125. Фиг. 126. Фиг. 127.

и тот же ток $2i_a$, равный сумме токов, подтекающих к щетке из двух параллельных цепей. Этот ток ($2i_a$) также равен сумме токов i_1 и i_2, проходящих к щетке через площади соприкосновения щетки с коллекторными пластинами F_1 и F_2 (см. фиг. 128). Пренебрегая сопротивлением коротко замкнутой катушки и соединительных проводников и при отсутствии всяких эл.-дв. сил, действующих в коротко замкнутой катушке, мы можем сказать, что токи i_1 и i_2, составляющие в сумме ток $2i_a$, будут разветвляться обратно пропорционально сопротивлениям R_1 и R_2 переходного слоя между щеткой и коллекторными пластинами I и II (закон Кирхгофа):

Фиг. 128.

$$\frac{i_1}{i_2}=\frac{R_2}{R_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (199)$$

Так как сопротивления переходного слоя обратно пропорциональны площадям соприкосновения щетки с коллекторными пластинами F_1 и F_2, то можно написать:

$$\frac{i_1}{i_2}=\frac{R_2}{R_1}=\frac{F_1}{F_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (200)$$

При одинаковой длине щетки вдоль оси коллектора, что обычно бывает, и равномерной скорости вращения якоря можно сказать, что

$$\frac{F_1}{F_{щ}}=\frac{t_1}{T}, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (201)$$

или

$$F_1 = F_щ \cdot \frac{t_1}{T}, \qquad (202)$$

где F_1 — площадь соприкосновения щетки с первой коллекторной пластиной,

$F_щ$ — площадь соприкосновения всей щетки с коллектором,

t_1 — время, протекшее с момента, когда щетка начала находить на коллекторную пластину I (с начала коммутации), до рассматриваемого момента,

и T — время полного перехода щетки с коллекторной пластины II на коллекторную пластину I (из положения фиг. 124 в положение фиг. 127) — время полного периода коммутации.

Аналогично можно написать:

$$\frac{F_2}{F_щ} = \frac{T - t_1}{T}, \qquad (203)$$

или

$$F_2 = F_щ \frac{T - t_1}{T}, \qquad (204)$$

где F_2 есть площадь соприкосновения щетки со второй коллекторной пластиной в рассматриваемый момент.

Отсюда:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{F_щ \cdot \frac{t_1}{T}}{F_щ \cdot \frac{T - t_1}{T}} = \frac{t_1}{T - t_1} \qquad (205)$$

На основании первого закона Кирхгофа для узлов 1 и 2 (см. фиг. 128) можно написать:

$$i_1 = i_a + i \qquad (206)$$

и

$$i_2 = i_a - i. \qquad (207)$$

Отсюда:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{i_a + i}{i_a - i} = \frac{t_1}{T - t_1}, \qquad (208)$$

или

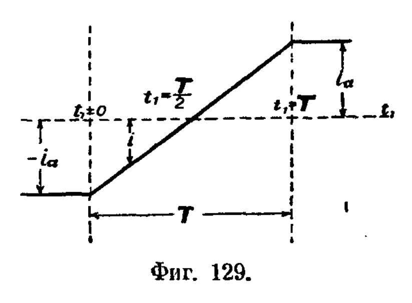
$$(i_a + i)(T - t_1) = (i_a - i)\, t_1. \qquad (209)$$

Производя упрощения, найдем:

$$i_a T + iT - i_a t_1 - it_1 = i_a t_1 - it_1;$$

$$i = i_a \frac{2t_1 - T}{T} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (210)$$

Последнее уравнение представляет собой зависимость изменения силы тока в коммутируемой катушке (i) от времени (t_1) за полный период коммутации (T) при определенной нагрузке машины [(при определенном токе в параллельной цепи обмотки якоря машины (i_a)]. В данном случае эта зависимость, очевидно, является прямолинейной, и кривая, представляющая графически (см. фиг. 129) изменение силы тока в коротко замкнутой катушке в зависимости от времени, так называемая переходная кривая тока, оказывается прямой линией.



Фиг. 129.

Для определенных моментов времени мы найдем значения силы тока i в коммутируемой катушке, подставив в правую часть равенства (210) значения t_1.

Так для моментов:

$t_1 = 0$ имеем $i = -i_a$ (начало коммутации),

$t_1 = \frac{T}{2}$ „ $i = 0$,

$t_1 = T$ „ $i = +i_a$ (конец коммутации).

Прямолинейная коммутация является самой совершенной, так как, вследствие пропорциональности увеличения тока на набегающей стороне щетки приращению площади соприкосновения щетки с коллектором, равным образом вследствие пропорциональности уменьшения тока на сбегающей стороне щетки уменьшению площади соприкосновения этой части щетки с коллектором,—плотность тока по всей поверхности соприкосновения щетки с коллектором во все время коммутации остается постоянной и вследствие этого не наблюдается местных перекалов щетки. Кроме того, вследствие того обстоятельства, что при прямолинейной коммутации к концу периода коммутации, когда щетка сходит

с предыдущей коллекторной пластины (с колл. пласт. II на фиг. 127) и когда коммутируемый элемент вступает в общую цепь новой параллельной ветви обмотки якоря, сила тока в коммутируемом элементе как-раз успевает достигнуть той величины, какая течет во всей новой параллельной ветви ($+i_a$ на фиг. 129).

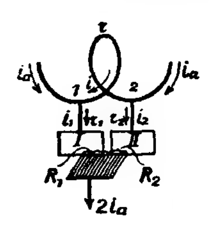
При таких обстоятельствах при переходе тока из новой параллельной ветви в нашу катушку не получится толчка тока, не появится большой эл.-дв. силы самоиндукции, не будет искрения на коллекторе.

3. Второй случай коммутации.

Не всегда сопротивление коммутируемой катушки бывает настолько мало, что им можно пренебречь.

Рассмотрим, как изменится форма переходной кривой тока в коммутируемой катушке при наличии заметной величины сопротивлений коротко замкнутой катушки и соединительных проводов.

Попрежнему считаем, что коммутация протекает очень медленно и величиной эл.-дв. силы самоиндукции и эл.-дв. силы, индуктированной внешним полем, пренебрегаем. Сопротивление переходного слоя между щеткой и коллектором принимаем во внимание.



Фиг. 130.

Направление токов предполагаем такое, как показано на фиг. 130. Ширину щетки попрежнему берем равной ширине коллекторной пластины. На основании равенств (202) и (204) имеем площади соприкосновения щетки с коллекторными пластинами I и II:

$$F_1 = F_щ \frac{t_1}{T}$$

и

$$F_2 = F_щ \frac{T - t_1}{T}.$$

Для сопротивлений каждого переходного слоя (по площадям F_1 и F_2) можно написать следующие выражения:

$$R_1 = \rho \frac{\delta}{F_1}, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (211)$$

$$R_2 = \rho \frac{\delta}{F_2}, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (212)$$

где ρ — удельное сопротивление переходного слоя и δ — толщина переходного слоя между щеткой и коллектором.

Аналогично этому можно написать выражение для сопротивления переходного слоя R в случае, когда щетка целиком налегает только на одну коллекторную пластину по площади $F_щ$.

$$R = \rho \frac{\delta}{F_щ} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (213)$$

Предполагая величину воздушной прослойки между щеткой и коллектором одинаковой, равным образом в силу одинаковости удельного сопротивления этого переходного слоя, на основании предыдущих выражений, найдем:

$$\frac{R_1}{R} = \frac{F_щ}{F_1} = \frac{F_щ}{F_щ \frac{t_1}{T}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (214)$$

и

$$\frac{R_2}{R} = \frac{F_щ}{F_2} = \frac{F_щ}{F_щ \frac{T-t_1}{T}}, \quad \ldots \ldots \quad (215)$$

или

$$R_1 = R\frac{T}{t_1} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (216)$$

и

$$R_2 = R\frac{T}{T-t_1} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (217)$$

Применим второй закон Кирхгофа (сумма падений напряжения в замкнутом контуре равняется сумме эл.-дв. сил, действующих в нем) к контуру (см. фиг. 130), состоящему из коротко замкнутого витка, двух соединительных проводов между ним и коллекторными пластинами, двух коллекторных пластин и щетки (включая переходный слой между щеткой и коллектором). Контур обходим против часовой стрелки, при чем падения напряжения от токов, идущих по направлению обхода, берем со знаком плюс, а в противоположном направлении — со знаком минус. Так как всеми эл.-дв. силами, действующими в контуре, мы здесь пренебрегаем, то сумма омических падений напряжения в этом случае должна равняться нулю.

$$i_1 r_1 + i_1 R_1 - i_2 R_2 - i_2 r_2 + ir = 0. \quad \ldots \quad (218)$$

Сопротивлением самих коллекторных пластин вследствие их всегда больших размеров можно пренебречь.

По первому закону Кирхгофа и здесь:

$$i_1 = i_a + i \qquad (219)$$

и

$$i_2 = i_a - i \qquad (220)$$

Подставляя эти выражения, а также выражения для R_1 и R_2 в уравнение (218) и полагая $r_2 = r_1$, что всегда можно сделать в силу симметрии обмотки, получим:

$$(i_a + i) r_1 + (i_a + i) R \frac{T}{t_1} - (i_a - i) R \frac{T}{T - t_1} - (i_a - i) r_1 + ir = 0.$$

Решаем это уравнение:

$$i_a r_1 + i r_1 + i_a R \frac{T}{t_1} + iR \frac{T}{t_1} - i_a R \frac{T}{T - t_1} + iR \frac{T}{T - t_1} - i_a r_1 + i r_1 + $$
$$+ ir = 0;$$

$$i(2r_1 + r) + iR\left(\frac{T}{t_1} + \frac{T}{T - t_1}\right) = i_a R \left(\frac{T}{T - t_1} - \frac{T}{t_1}\right).$$

Обозначая $2r_1 + r = R'$, имеем:

$$iR' + iR \frac{T^2}{t_1(T - t_1)} = i_a R \frac{T(2t_1 - T)}{t_1(T - t_1)},$$

или

$$i = i_a \frac{\dfrac{RT(2t_1 - T)}{t_1(T - t_1)}}{R' + \dfrac{RT^2}{t_1(T - t_1)}}.$$

Откуда:

$$i = i_a \frac{2t_1 - T}{\dfrac{R'}{R} \cdot \dfrac{t_1(T - t_1)}{T} + T} \qquad (221)$$

Это уравнение не прямой. Следовательно в этом случае коммутация получается не прямолинейной.

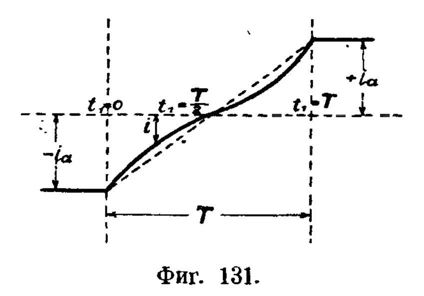
При известных значениях R', R и T, которые без особого труда могут быть определены, можно построить переходную кривую тока при коммутации $[i = f(t_1)]$ по точкам, подставляя в пра-

вую часть равенства различные значения для t_1 (см. кривую фиг. 131).

Для характерных моментов получаем следующие значения для i:

$$\text{для } t_1 = 0 \quad \text{имеем } i = -i_a,$$
$$\text{"} \quad t_1 = \frac{T}{2} \quad \text{"} \quad i = 0,$$
$$\text{"} \quad t_1 = T \quad \text{"} \quad i = +i_a.$$

Как видно из кривой фиг. 131, коммутация получается сначала ускоренной против прямолинейной, а затем замедленной. При обычных соотношениях между R' и R отклонение от прямолинейности получается сравнительно небольшое.



Фиг. 131.

Переходная кривая будет тем ближе к прямолинейной, чем меньше R' по сравнению с R. Когда R' бесконечно мало по сравнению с R, им можно пренебречь. Тогда выражение (221) обращается в следующее:

$$i = i_a \frac{2t_1 - T}{T}, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (222)$$

т.-е. знакомое нам (см. первый случай коммутации) уравнение прямолинейной коммутации.

4. Третий (общий) случай коммутации.

Рассмотрим теперь случай работы машины при нормальной скорости, когда, следовательно, и процесс коммутации протекает с некоторой конечной скоростью.

При этих условиях, вследствие изменения тока, в коммутируемой катушке должна возбуждаться эл.-дв. сила самоиндукции, определяемая выражением:

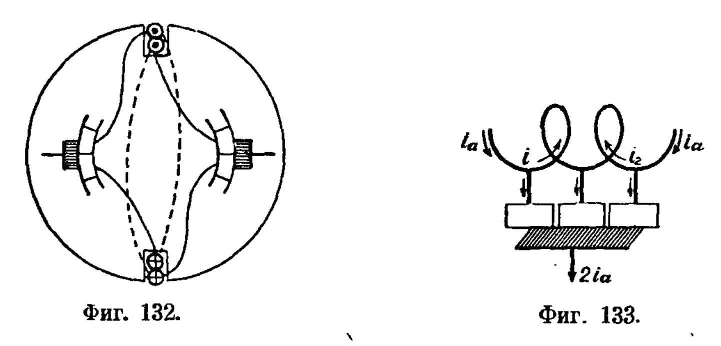
$$e_s = -L \frac{di}{dt} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (223)$$

При барабанных якорях в одной и той же впадине могут оказаться элементы, находящиеся одновременно в коммутации,

коротко замыкаемые соседними щетками (см. фиг. 132). Изменение тока (i_1) в соседней катушке вызывает в рассматриваемой нами катушке эл.-дв. силу взаимоиндукции

$$e_{m_1} = -M_1 \frac{di_1}{dt} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (224)$$

В случае, если бы ширина щетки была более ширины коллекторной пластины, рядом с нашей катушкой могут лежать еще коротко замкнутые катушки, в которых также будет происходить изменение тока (i_2) (см. фиг. 133). Это изменение тока i_2 также



Фиг. 132. Фиг. 133.

будет индуктировать в нашей катушке эл.-дв. силу взаимоиндукции

$$e_{m_2} = -M_2 \frac{di_2}{dt} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (225)$$

Аналогичные эл.-дв. силы взаимоиндукции e_{m_3}, e_{m_4} и т. д. будут индуктироваться в нашей катушке и изменением тока в каждой из других соседних катушек, где происходит коммутация.

Таким образом изменение величины тока в рассматриваемой коммутируемой катушке и соседних с ней вызовет в этой катушке некоторую результирующую эл.-дв. силу — эл.-дв. силу реактивную

$$e_r = e_s + e_{m_1} + e_{m_2} + e_{m_3} + e_{m_4} + \ldots = -L\frac{di}{dt} - M_1\frac{di_1}{dt} - M_2\frac{di_2}{dt} \quad (226)$$

Вообще говоря, изменения токов в коммутируемой катушке и соседних $\frac{di}{dt}$, $\frac{di_1}{dt}$, $\frac{di_2}{dt}$ и т. д. не будут равны между собой.

Только в частном случае, когда коммутация во всех катушках происходит по закону прямой линии, можно считать, что эти изменения токов будут равняться друг другу

$$\frac{di}{dt}=\frac{di_1}{dt}=\frac{di_2}{dt}= \dots \qquad (227)$$

Так как прямолинейная коммутация обеспечивает безъискровую работу машины, как мы говорили выше, то всегда и стремятся приблизиться к условиям ее. В силу этого мы и в настоящем случае будем предполагать коммутацию происходящей по закону прямой линии. Тогда можно предположить существующим и указанное в выражении (227) равенство. При таких условиях можно написать:

$$e_r=-L\frac{di}{dt}-M_1\frac{di_1}{dt}-M_2\frac{di_2}{dt}-\dots=$$

$$=-(L+M_1+M_2+\dots)\frac{di}{dt}=-L_r\frac{di}{dt}, \dots \qquad (228)$$

где

$$L_r=L+M_1+M_2+\dots \qquad (229)$$

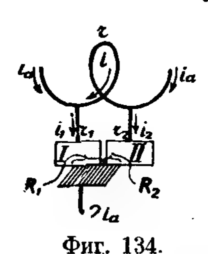
Так как при изменении нагрузки физическая нейтраль обычно меняет свое положение, то кроме эл.-дв. силы реакции в коротко замкнутом витке индуктируется еще эл.-дв. сила, возбуждаемая внешним полем. Если коротко замкнутый виток в момент коммутации находится в поле той же полярности, что и до коммутации, то направление индуктированной в нем этим полем эл.-дв. силы будет совпадать с общим направлением эл.-дв. силы, индуктированной в той параллельной цепи, из которой коммутируемая катушка только что вышла.

Если же в момент коммутации коротко замкнутый виток уже успел попасть в поле другой полярности, то индуктированная в нем внешним полем эл.-дв. сила будет иметь противоположное направление по отношению к эл.-дв. силе предыдущей параллельной цепи.

Обозначим эту эл.-дв. силу, индуктированную внешним полем (эл.-дв. силу внешнего поля), через e_k.

Предполагая ширину щетки ($b_{щ}$) и в этом случае равной ширине коллекторной пластины (t_k — коллекторному делению), при-

меним к замкнутому контуру коммутируемого витка (см. фиг. 134) второй закон Кирхгофа, учитывая на этот раз и действующие в этом контуре эл.-дв. силы (e_r и e_k). В контуре имеются все те же омические сопротивления, что и в предыдущем случае. Поэтому сумма падений напряжения будет иметь тот же вид, что и в предыдущем случае, только в правой части равенства вместо нуля будет сумма эл.-дв. сил реакции и внешнего поля. Таким образом здесь мы имеем для этого контура следующее уравнение:



Фиг. 134.

$$i_1 r_1 + i_1 R_1 - i_2 R_2 - i_2 r_2 + ir = e_r + e_k \quad \ldots \quad (230)$$

Найдем, при каких условиях и в этом случае (при наличии эл.-дв. силы реактивной) коммутация может получиться прямолинейной.

Аналогично предыдущему случаю, подставляем вместо $i_1 = i_a + i$ и вместо $i_2 = i_a - i$, приравниваем $r_2 = r_1$ и полагаем $2r_1 + r = R'$. С другой стороны, при поставленном нами условии, что коммутация должна протекать прямолинейно, изменение тока в коротко замкнутом витке должно происходить по закону (см. 1-й и 2-й случай коммутации):

$$i = i_a \frac{2t_1 - T}{T} \quad \ldots \quad (231)$$

Имея это в виду, найдем:

$$i_1 = i_a + i = i_a + i_a \frac{2t_1 - T}{T} = i_a \left(1 + \frac{2t_1 - T}{T}\right) =$$

$$= i_a \cdot \frac{2t_1}{T} \quad \ldots \quad (232)$$

Соответственно этому и

$$i_2 = i_a - i = i_a - i_a \frac{2t_1 - T}{T} = i_a \left(1 - \frac{2t_1 - T}{T}\right) =$$

$$= i_a \frac{2(T - t_1)}{T} \quad \ldots \quad (233)$$

На основании этих равенств уравнение (230) можно переписать следующим образом:

$$i_a r_1 + i r_1 + i_a \frac{2t_1}{T} R . \frac{T}{t_1} - i_a \frac{2(T - t_1)}{T} \cdot R \frac{T}{T - t_1} - i_a r_1 +$$

$$+ i r_1 + ir = i(2r_1 + r) = e_r + e_k,$$

или

$$iR' = e_r + e_k \quad \ldots \quad (234)$$

Так как сопротивление коротко замкнутого витка и соединительных проводников обычно бывает очень мало, то омическим падением напряжения в них можно пренебречь и равенство (234) переписать следующим образом:

$$e_r + e_k = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (235)$$

Таким образом для получения в этом случае прямолинейной коммутации необходимо, чтобы эл.-дв. сила, индуктированная в коротко замкнутом витке внешним полем, компенсировала в этом витке эл.-дв. силу реакции, т.-е. была ей равна и прямо противоположна по направлению.

Практически с указанной целью или сдвигают щетки с нейтрали в ту или другую сторону, или, не сдвигая щеток с геометрической нейтрали, устраивают необходимое для создания соответствующей эл.-дв. силы поле — коммутирующее поле — при помощи добавочных полюсов.

В первом случае в генераторе щетки сдвигают за физическую нейтраль по направлению вращения, чтобы коротко замкнутая катушка оказалась в поле другой полярности.

В двигателе, наоборот, щетки сдвигают против направления вращения, чтобы коротко замкнутый виток оказался в поле той же полярности, что и до начала коммутации.

Что действительно в генераторе приходится щетки сдвигать по направлению, а в двигателе против направления вращения, видно из следующего.

В генераторе сила тока в параллельной цепи (из которой выходит коммутируемый виток) обмотки якоря i_a определяется индуктированной в этой цепи эл.-дв. силой E_a и имеет с ней одно направление. Эл.-дв. сила самоиндукции стремится поддержать то же значение тока, какое было до начала коммутации. При коммутации ток в коммутируемой катушке от значения, равного току во всей параллельной цепи (i_a), все время уменьшаясь, принимает обратное направление. Следовательно эл.-дв. сила самоиндукции (реактивная эл.-дв. сила), стремясь поддержать прежнюю величину и направление тока, будет направлена так же, как шел ток в нашем витке до начала коммутации, т.-е. как ток (i_a) в первой [1]) параллельной цепи. Следовательно эл.-дв. сила само-

[1]) Первой мы называем ту параллельную цепь обмотки, в которую входил коммутируемы виток до начала коммутации.

индукции направлена так же, как и эл.-дв. сила E_a всей первой параллельной цепи. Следовательно эл.-дв. сила внешнего поля e_k должна быть равна и направлена против эл.-дв. силы самоиндукции (против e_r). Отсюда следует, что эл.-дв. сила внешнего поля должна быть направлена против эл.-дв. силы E_a первой параллельной цепи, или, другими словами, коротко замкнутый виток должен находиться в поле другой полярности, чем поле той параллельной цепи, в которой виток находился до коммутации. Этого мы достигнем, сдвигая щетки по направлению вращения за физическую нейтраль.

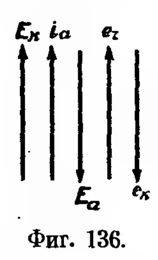
Указанные соотношения между направлениями эл.-дв. сил и тока в коротко замкнутом витке генератора могут быть представлены в виде следующей условной диаграммы (см. фиг. 135), представляющей собой относительные направления этих эл.-дв. сил и тока. После изложенного эта диаграмма понятна без дальнейших пояснений.

Фиг. 135.

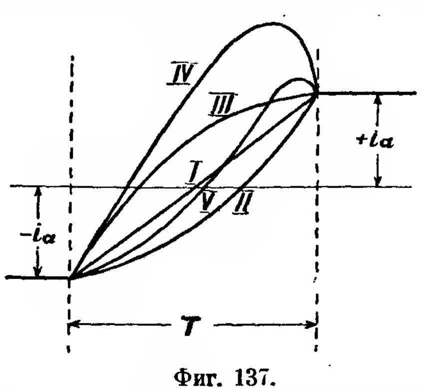
В двигателе направление тока в якоре и отдельных параллельных ветвях его обмотки определяется напряжением E_k, подведенным к зажимам его от постороннего источника тока. При вращении в обмотке якоря индуктируется обратная эл.-дв. сила E_a, направленная против подведенного к зажимам двигателя напряжения и, следовательно, против протекающего по обмотке якоря тока.

При коммутации ток в коротко замкнутом витке уменьшается, эл.-дв. сила самоиндукции стремится поддержать его и, следовательно, направлена так же, как ток, или против обратной эл.-дв. силы двигателя. Эл.-дв. сила внешнего поля должна быть направлена против эл.-дв. силы самоиндукции и, следовательно, в двигателе должна быть направлена против направления тока i_a в коротко замкнутом витке до коммутации или по направлению обратной эл.-дв. силы E_a. Таким образом мы приходим к заключению, что здесь коротко замкнутый виток должен в момент коммутации находиться в том же поле, что и до коммутации, щетки нужно сдвинуть против направления вращения двигателя, чтобы виток находился в том же поле до физической нейтрали. Условная диаграмма направления эл.-дв. сил и тока в этом случае представлена на фиг. 136. Диаграмма и здесь понятна без пояснений.

В случае, если эл.-дв. сила внешнего поля e_k не компенсирует эл.-дв. силы реакции e_r, переходная кривая тока в коммутируемой катушке не является прямолинейной и может иметь различный вид (см. фиг. 137).



Фиг. 136.



Фиг. 137.

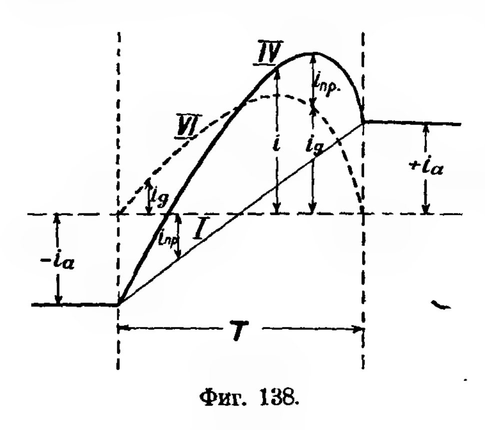
Кривая (прямая) *I* (фиг. 137) представляет собой переходную кривую тока для случая прямолинейной коммутации, когда эл.-дв. сила внешнего поля вполне скомпенсировала эл.-дв. силу реакции (и омическое падение напряжения).

Кривая *II* представляет случай, когда эл.-дв. сила реакции больше эл.-дв. силы внешнего поля и коммутация поэтому является замедленной. Кривые *III* и *IV* представляют собой переходные кривые для случая, когда эл.-дв. сила внешнего поля получается большей (в большей или меньшей степени), чем эл.-дв. сила реакции и коммутация поэтому протекает быстрее, чем прямолинейная (ускоренная коммутация). Наконец, в условиях кривой *V*, коммутация вначале протекает замедленно (больше реактивная эл.-дв. сила), а во вторую половину периода коммутация является ускоренной (больше эл.-дв. с. внешнего поля).

Из кривых ясно, что при неравенстве эл.-дв. сил реакции и внешнего поля (при ускоренной или замедленной коммутации) плотность тока в какой-нибудь коллекторной пластине в различные моменты коммутации не остается постоянной, а меняется, и, например, при кривых *III* и *IV* в первый период коммутации оказывается меньшей средней плотности под всей щеткой и, наоборот, в конце коммутации в этой же коллекторной пластине плотность тока оказывается повышенной против средней, что иногда и ведет к искрению.

Неравномерное распределение плотности под щеткой можно представить себе как результат добавочных токов (токов короткого замыкания) i_g, циркулирующих в цепи коротко замкнутого

витка и налагающихся на прямолинейную часть тока коммутации i, протекающего в коротко замкнутом витке. Величина этого тока короткого замыкания i_g определяется величиной алгебраической суммы эл.-дв. сил реакции и внешнего поля $e_r + e_k$ (см. уравнение 230), с одной стороны и, с другой стороны, суммой всех сопротивлений цепи.



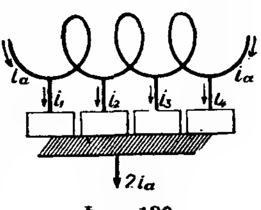
Фиг. 138.

Величину этого добавочного тока короткого замыкания можно получить, вычитая из значений тока, по действительной переходной кривой тока, те значения, которые ток имел бы при прямолинейной коммутации, т.-е. вычитая, например, из кривой *IV* кривую *I* фиг. 138). Кривая *IV* на этой фигуре представляет собой полученную таким образом кривую изменения добавочного тока короткого замыкания i_g в коммутируемой катушке.

Как мы сказали выше, для хорошей коммутации выгодно, когда коммутация происходит прямолинейно и, следовательно, ток короткого замыкания i_g равен нулю. Также выгодно для получения безъискровой коммутации, когда переходная кривая тока i проходит так, как показано на кривой *III* (см. фиг. 137), т.-е. когда прямая установившегося после коммутации тока $(+i_a)$ является касательной к переходной кривой (i). В этом случае к концу коммутации величина эл.-дв. силы самоиндукции, являющейся главной причиной искажения переходной кривой тока и искрения, постепенно уменьшается, делаясь равной нулю в последний момент, когда переходная кривая касается прямой $+i_a$ и $\frac{di}{dt}=0$. Вообще все переходные кривые тока, располагающиеся между прямой *I* и кривой *III* (фиг. 137), являются благоприятными для коммутации и обеспечивают безъискровую работу машины.

5. Коммутация, когда ширина щетки больше ширины коллекторной пластины ($b_щ > t_k$).

В самом общем случае работы машины ширина щетки бывает больше ширины коллекторной пластины, и щетка перекрывает обычно несколько соседних коллекторных пластин (см. фиг. 139).



Фиг. 139.

При таких условиях, благодаря увеличению числа одновременно коммутируемых катушек, величина суммарного потока рассеяния, определяющего величину реактивной эл.-дв. силы, увеличивается — обстоятельство, могущее ухудшить условия коммутации.

С другой стороны, в силу большей ширины щетки, последняя более продолжительное время остается в соприкосновении с коллекторными пластинами, с которыми соединяются концы рассматриваемой коммутируемой катушки.

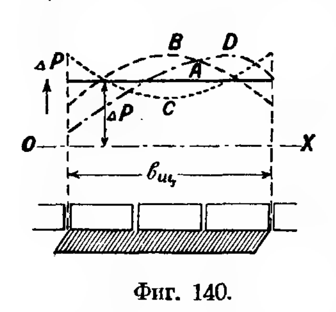
Благодаря этому период коммутации (T) увеличивается, что является выгодным для коммутации, так как вместе с этим уменьшается реактивная эл.-дв. сила.

Приведенного ранее достаточно, чтобы сказать, что и в этом случае (при малых значениях сопротивлений как самих коммутируемых катушек, так и проводников, соединяющих катушки с коллекторными пластинами) задача получения правильной безъискровой коммутации сводится к компенсации получающейся в коротко замкнутой катушке реактивной эл.-дв. силы при помощи равной ей и противоположно направленной эл.-дв. силы, индуктированной в катушке внешним полем. Необходимое внешнее поле и здесь создается или путем сдвига щеток с нейтрали, или при помощи добавочных полюсов, или компенсационной обмотки (иногда и тех и другой вместе).

При полной компенсации реактивной электродвижущей силы переходная кривая тока в коммутириемой катушке получается прямолинейной (пренебрегая небольшим искажением под влиянием омических сопротивлений катушки и соединительных проводов). Распределение плотности тока будет в этом случае под всей щеткой равномерным, и добавочного тока короткого замыкания не будет ($i_g = 0$).

При равномерном распределении плотности тока под щеткой и падение напряжения в переходном слое (ΔP — разность по-

тенциалов между щеткой и коллектором) по параллельным направлениям между щеткой и коллектором по всей контактной поверхности щетки будет одинаковое. Так называемая потенциальная кривая, представляющая картину распределения потенциала под щеткой по окружности коллектора, представилась бы, в случае прямолинейной коммутации, прямой линией, параллельной оси абсцисс (см. фиг. 140, прямая A). При неполной компенсации реактивной эл.-дв. силы (и падений напряжения от сопротивлений) получаются выпуклые или вогнутые кривые, симметрично и несимметрично расположенные относительно оси щетки (кривые B, C и D, фиг. 140). При невозможности получить вполне прямолинейную форму потенциальной кривой (что обычно бывает) стремятся, по крайней мере, получить кривую, симметрично расположенную по отношению к оси щетки так, чтобы потенциалы под набегающим и сбегающим краями щетки были одинаковые.



Фиг. 140.

6. Расчет величины реактивной электродвижущей силы.

Расчет будем вести в предположении прямолинейной коммутации, к которой всегда надлежит стремиться. При прямолинейной коммутации, как мы видели выше, изменение силы тока за единицу времени во всех одновременно коммутируемых катушках одинаково $\left(\frac{di}{dt}=\frac{di_1}{dt}=\frac{di_2}{dt}\text{ и т. д.}\right)$. Отсюда реактивная эл.-дв. сила будет пропорциональна изменению тока за единицу времени в какой-нибудь одной катушке, например рассматриваемой нами. С другой стороны, для прямолинейной переходной кривой тока приращение величины тока за единицу времени для любого момента времени коммутации одинаково (как это легко видеть из переходной прямой тока, фиг. 129) и равняется полному изменению тока за полный период коммутации, то-есть

$$\frac{di}{dt}=\frac{2i_a}{T} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (236)$$

В общем случае, когда ширина щетки более ширины коллекторного деления, такое изменение тока будет происходить одно-

временно в нескольких катушках. Число одновременно коммутируемых катушек определится из отношения:

$$\frac{b_{щ}}{t_k}. \qquad (237)$$

Рассматривая фиг. 139 и относительные положения щетки и коллектора, легко видеть, что, когда

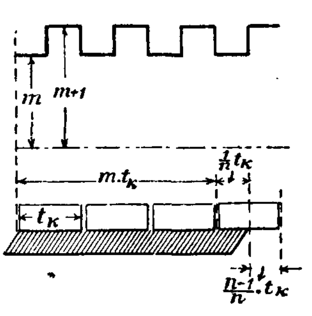
$$\frac{b_{щ}}{t_k} = m = \text{целому числу}, \qquad (238)$$

число одновременно коротко замкнутых щеткой катушек точно представляется этим отношением $m = \frac{b_{щ}}{t_k}$ (кроме чрезвычайно кратких моментов перехода краями щетки изоляционных прослоек между коллекторными пластинами).

В случае же, если отношение $\frac{b_{щ}}{t_k}$ — не целое число, а дробная величина, например

$$\frac{b_{щ}}{t_k} = m + \frac{1}{n}, \qquad (239)$$

где m и n — целые числа, то число одновременно коротко замкнутых катушек будет равно то m то $m+1$. Изменение числа коротко замкнутых щеткой катушек можно представить в виде диаграммы фиг. 141, где ординаты представляют собой число коротко замкнутых катушек в зависимости от положения левого края щетки при относительном сдвижении ее вправо. Из фиг. 141 легко установить, что число коротко замкнутых катушек будет m в течение времени продвижения щетки на расстоянии $\frac{n-1}{n} t_k$ деления коллекторной пластины и $m+1$ в течение времени продвижения щетки на расстоянии $\frac{1}{n} t_k$ коллекторного деления. В среднем число одновременно коротко замкнутых катушек будет равно:



Фиг. 141.

$$k = \frac{m\left(\frac{n-1}{n} t_k\right) + (m+1)\frac{1}{n} t_k}{t_k} = m + \frac{1}{n} = \frac{b_{щ}}{t_k}. \quad (240)$$

Если у нас имеются несколько $\left(\text{например } k = \frac{b_{щ}}{t_к}\right)$ одновременно коммутируемых катушек, то при расчете реактивной эл.-дв. силы, как мы уже указывали, нельзя ограничиваться рассмотрением изменения величины тока только в одной катушке, — приходится учитывать влияние изменения тока в соседних катушках. Влияние изменения токов в соседних проводниках на величину реактивной эл.-дв. силы мы учтем, определяя последнюю на основании расчета изменения величины магнитного потока рассеяния, создаваемого всем пучком коротко замкнутых витков.

При средней величине числа коротко замкнутых витков $\frac{b_{щ}}{t_к}$ для расчета изменения общего объема тока в зоне коммутации не имеет значения, начинает ли коммутация происходить во всех $\frac{b_{щ}}{t_к}$ элементах одновременно или в разное время, лишь бы среднее изменение тока за единицу времени в каждом из них оставалось одно и то же $\frac{di}{dt} = \frac{2i_a}{T}$. С этой стороны без всякой ошибки для конечных результатов мы можем считать, что коммутация во всех $\frac{b_{щ}}{t_к}$ катушках начинается и заканчивается одновременно, продолжаясь T секунд. При таких условиях найдем величину общего объема тока во всем пучке из $\frac{b_{щ}}{t_к}$ катушек до начала коммутации. Весь пучок будет иметь в среднем всего $\frac{b_{щ}}{t_к} w$ проводников в одной зоне коммутации, где w — число витков в одной катушке. При токе в одной параллельной цепи в i_a ампер имеем общий объем тока в рассматриваемом пучке до начала коммутации

$$\frac{b_{щ}}{t_к} \cdot w \cdot i_a . \qquad (241)$$

Такой же объем тока, только противоположного направления, мы будем иметь и по окончании коммутации в этом пучке.

Выражение для суммарного объема тока в пучке может быть представлено несколько в ином виде. Действительно, сдвигу по коллектору на одно деление коллекторной пластины соответствует проход по обмотке одного элемента (состоящего из w витков).

с общим объемом тока в сечении проводов в одной зоне коммутации

$$i_a w = \frac{AS.\, t_k'}{2}\ ^{1)}, \qquad (242)$$

где $AS = \frac{Ni_a}{\pi D_{як}}$ есть линейная нагрузка током на 1 *см* длины окружности якоря, а t'_k есть ширина коллекторного деления, приведенная к длине окружности якоря, то-есть

$$t'_k = t_k \frac{D_{як}}{D_{кол}}, \qquad (243)$$

где t_k — коллекторное деление, измеренное по окружности коллектора,

$D_{як}$ — диаметр якоря,

$D_{кол}$ — диаметр коллектора.

Отсюда суммарный объем тока в коммутируемом пучке будет равен:

$$\frac{b_щ}{t_k} \cdot w \cdot i_a = \frac{b_щ}{t_k} \cdot \frac{AS \cdot t'_k}{2} = \frac{b'_щ}{t'_k} \cdot \frac{AS \cdot t'_k}{2} = \frac{b'_щ AS}{2}, \qquad (244)$$

где

$$b'_щ = b_щ \frac{D_{як}}{D_{кол}} \qquad (245)$$

ширина щетки, приведенная также к длине окружности якоря. Очевидно,

$$\frac{b_щ}{t_k} = \frac{b'_щ}{t'_k}.$$

Зная объем тока в коммутируемом пучке до начала и после окончания коммутации, было бы легко определить и соответствующие потоки рассеяния (Φ_s), охватывающие этот пучок, если бы мы знали, сколько магнитных линий рассеяния создается током в 1 ампер, протекающим по одному проводнику, на 1 *см* длины проводника. Очевидно, эта величина будет различная для длины проводников, уложенных в пазах в железе якоря и для лобовых соединений. Обозначим через ξ — число линий магнит-

---

1) Здесь для объема тока одной катушки в одной зоне коммутации нужно брать величину $\frac{AS \cdot t_k'}{2}$, так как в сечении, перпендикулярном к оси якоря, проводники одной катушки встречаются дважды (в двух зонах коммутации).

ного рассеяния на 1 ампер тока в одном проводнике и на 1 *см* активной длины этого проводника. Под активной длиной проводника мы понимаем ту часть его (длиной L *см*), которая лежит в железе якоря, при чем к этой же длине приводим и магнитные линии рассеяния проводников, получающиеся на длине лобовых соединений. Эти линии рассеяния лобовых соединений являются уже включенными в величину ξ.

Тогда поток рассеяния Φ'_s, охватывающий весь коммутируемый пучок проводников по всей длине его витков, будет равен:

$$\Phi'_s = \xi \cdot 2L \cdot \frac{b'_{щ} \cdot AS}{2} = \xi \cdot L \cdot b'_{щ} \cdot AS \quad . \; . \; . \; . \; (246)$$

В случае неукороченного (или мало укороченного) шага обмотки в одной и той же зоне коммутации (но в другом слое) будут находиться проводники другого коммутируемого пучка, коротко замыкаемые щеткой другого знака. Таким образом общий поток рассеяния, определяющий величину реактивной эл.-дв. силы, будет в этом случае равен:

$$\Phi_s = 2\xi \cdot L \cdot b'_{щ} AS \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (247)$$

По окончании коммутации поток рассеяния около этого двойного пучка проводников будет равен той же величине, но с обратным знаком:

$$-\Phi_s = -2\xi \cdot L \cdot b'_{щ} AS \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (248)$$

Общее изменение потока за время коммутации (T) будет равно:

$$-\frac{d\Phi_s}{dt} = \frac{4 \cdot \xi \cdot L \cdot b'_{щ} AS}{T} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (249)$$

Отсюда реактивная эл.-дв. сила, индуктированная этим изменением потока рассеяния в коротко замкнутой катушке из w витков, будет равна:

$$e_r = -w \frac{d\Phi_s}{dt} 10^{-8} = \frac{4 \cdot w \cdot \xi \cdot L \cdot b'_{щ} AS}{T} 10^{-8} \text{ вольт} \; . \quad (250)$$

Так как

$$T = \frac{b'_{щ}}{v}, \text{ или } \frac{b'_{щ}}{T} = v, \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (251)$$

то выражение (250) можно переписать так:

$$e_r = 4w \cdot \xi \cdot v \cdot L \cdot AS \cdot 10^{-8} \text{ вольт.} \quad . \; . \; . \; . \; (252)$$

По данным Hobart'а для обычных условий в машинах можно положить в среднем, что 1 *см* длины проводника в активной части (в железе якоря) при токе в 1 ампер создает 4 магнитные линии рассеяния, а 1 *см* длины проводника лобовых соединений при том же токе создает 0,8 магнитных линий рассеяния. Отсюда, если мы обозначим через L длину активной части проводника (длина якоря без вентиляционных каналов), а через L_b длину суммарных лобовых соединений на один виток, то для одного полного витка обмотки при силе тока в 1 ампер получим поток рассеяния, равный:

$$4 \cdot 2L + 0{,}8L_b, \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (253')$$

откуда определится величина ξ.

$$\xi = \frac{4 \cdot 2L + 0{,}8L_b}{2L} = 4 + 0{,}4\frac{L_b}{L}. \quad . \; . \; . \; . \; (253)$$

Эта величина обычно колеблется в довольно широких пределах и в среднем равна от 3 до 6 линий.

Пример:

$$L = 24 \text{ см}, \quad L_b = 86 \text{ см},$$

$$\xi = 4 + 0{,}4\frac{86}{24} = 5{,}43 \text{ линий.}$$

7. Величина коммутирующего поля и условия, необходимые для получения хорошей коммутации.

Для получения хорошей коммутации и безыскровой работы электрической машины постоянного тока необходимо соблюдение целого ряда условий.

а) Одним из главных условий является компенсация получающейся в коротко замкнутом витке эл.-дв. силы самоиндукции (для получения прямолинейной коммутации). Как мы указывали выше, эту компенсацию можно производить при помощи эл.-дв. силы, создаваемой в коммутируемом витке внешним полем. Величину потребного для этого внешнего поля в зоне коммутации легко найти из следующих соображений.

При постоянной средней величине внешнего коммутирующего поля B_k, постоянной скорости по окружности якоря v *см* в секунду, числе витков в одной катушке w, длине активной части проводников L *см* и имея в виду, что каждый виток катушки имеет две активные стороны, получим индуктированную в коммутируемой катушке эл.-дв. силу, равной:

$$e_k = 2\,B_k \cdot v \cdot w \cdot L \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad \ldots \ldots (254)$$

С другой стороны, выше (выраж. 252) мы получили выражение для реактивной эл.-дв. силы:

$$e_r = 4w \cdot \xi \cdot v \cdot L \cdot AS \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

Для прямолинейной коммутации (пренебрегая сопротивлениями) необходимо, чтобы

$$e_k = e_r;$$

$$2B_k \cdot v \cdot w \cdot L \cdot 10^{-8} = 4w\,\xi \cdot v \cdot L \cdot AS \cdot 10^{-8} \quad \ldots (255)$$

Отсюда получим необходимую величину коммутирующего поля

$$B_k = 2\xi \cdot AS. \quad \ldots \ldots \ldots (256)$$

Это поле, как мы говорили, получается в зоне коммутации или благодаря сдвигу щеток с нейтральной оси в генераторе по направлению вращения и в двигателе против направления вращения, или без сдвига щеток при помощи дополнительных полюсов.

Так как в машине без дополнительных полюсов с изменением нагрузки изменяется положение физической нейтрали, то меняется и величина внешнего (коммутирующего) поля в зоне коммутации, если щетки при всех нагрузках держать в одном положении.

Изменение коммутирующего поля ведет за собой изменение индуктированной им эл.-дв. силы e_k, чем нарушается равенство $e_k = e_r$. При таких обстоятельствах легко могут появиться добавочные токи в коротко замкнутом витке, искажающие равномерное распределение плотности тока под щеткой и могущие повести к искрообразованию.

Если полное компенсирование эл.-дв. силы самоиндукции в коротко замкнутом витке обычно представляется затруднительным, то для получения безъискровой работы на коллекторе все

же остается требование, чтобы разность между абсолютными значениями e_r и e_k была возможна мала.

Для появления и поддержания искрообразования на коллекторе, как показывает исследование этого вопроса, необходимы, с одной стороны, достаточная разность потенциалов между сбегающим или набегающим концом щетки и соответствующей коллекторной пластиной и, с другой стороны, достаточно большая плотность тока между щеткой и коллектором в месте искрения.

При щетках, подобранных с нормальной средней плотностью тока под ними (см. далее), местные увеличения плотности тока и разности потенциалов между щеткой и коллектором возможны лишь при наличии нескомпенсированных эл.-дв. сил, действующих в коммутируемых катушках.

Для того чтобы разность между величинами e_r и e_k была мала, выгодно, чтобы величина реактивной эл.-дв. силы была вообще невелика. Практика показала, что удовлетворительная коммутация может быть получена при постоянном положении щеток, если реактивная эл.-дв. сила будет не более 2—2,5 вольт для машин, имеющих постоянное направление вращения, при чем в этом случае щетки устанавливаются таким образом, чтобы полная компенсация реактивной эл.-дв. силы получилась при половинной нагрузке машины. Тогда мы имеем при полной нагрузке некоторую недокомпенсацию реактивной эл.-дв. силы, при холостом же ходе—перекомпенсацию, но в допустимых пределах. При реверсивных машинах щетки устанавливаются по геометрической нейтрали, и реактивная эл.-дв. сила, вычисленная для полной нагрузки по формуле (252), не должна превосходить 1—1,5 вольта. При бóльших значениях получающейся реактивной эл.-дв. силы рекомендуется обязательно снабжать машину дополнительными полюсами.

Указанные нормы для величины реактивной эл.-дв. силы являются первым и самым главным условием для правильной коммутации.

Из дальнейших требований, которые должны быть предъявлены к машине в целях получения хорошей коммутации, можно указать следующие:

б) Магнитное поле в зоне коммутации должно быть по возможности спокойно, не должно быть резких пульсаций. Отсюда, так как малое число больших впадин вызывает сильные пульсации поля, необходимо, чтобы число впадин на якоре не было слишком мало.

Обычно берется не меньше 12 впадин на полюс. Только в трамвайных двигателях и совсем малых машинах идут ниже до 8—9 при условии сильного насыщения железа зубцов. Со стороны более постоянного поля выгоднее брать большее междужелезное пространство, так как тогда наличие впадин играет меньшую роль.

в) Следующее условие требует, чтобы внешнее поле в зоне коммутации было по возможности постоянным и во всяком случае не сильно меняющимся. С этой стороны необходимо, чтобы, при помощи соответствующей установки щеток и выбора формы поля, коротко замкнутые витки оказались между полюсами и возможно дальше от края полюсов, где поле начинает резко возрастать. Надо при этом считаться с тем, что с нагрузкой все поле несколько сдвигается в ту или другую сторону.

г) Необходимо также, чтобы отдельные проводники, относящиеся к одному и тому же коммутируемому пучку, не занимали в поле слишком различного в магнитном отношении положения, что может повести к искажению прямолинейности переходной кривой тока.

Обычные размеры ширины зоны коммутации не должны превосходить следующих примерных величин:

$$\lambda = b'_{щ} = \left(\text{от } \frac{1}{6} \text{ до } \frac{1}{12}\right)\tau \quad \ldots \ldots \quad (257)$$

Первую цифру в качестве предела берут для маленьких машин низкого напряжения, последняя цифра берется для машин средней и большой мощности. В машинах с большим полюсным делением (свыше 600 *мм*) зону коммутации берут еще меньше:

$$\lambda = b'_{щ} < \frac{1}{18}\tau \quad \ldots \ldots \quad (258)$$

Здесь τ есть полюсное деление.

Для получения ширины зоны коммутации в указанных пределах выбирают ширину щеток с таким расчетом, чтобы они перекрывали от 2 до 3,5 коллекторных пластин.

д) При очень большой реакции якоря может оказаться, что при расположении зоны коммутации между полюсами магнитное поле в зоне коммутации получает отрицательное значение. Для получения минимального значения поля в зоне коммутации положительным пришлось бы сдвинуть щетку так, чтобы комму-

тируемые катушки оказались под полюсом. Последнее нежелательно (см. выше) вследствие возможности резкого изменения поля под полюсом с нагрузкой. Для того чтобы этого не случилось и чтобы иметь зону коммутации между полюсами, необходимо, чтобы

$$AW_l + AW_z \geq \frac{1}{2} a\tau \cdot AS \quad \ldots\ldots\ldots \quad (259)$$

е) Для уменьшения потока рассеяния около коммутируемого пучка проводов необходимо сделать проводимость пути магнитных линий этого потока возможно меньшей. Так как поток рассеяния проходит через впадины, то с этой стороны выгоднее делать последние более широкими и низкими, укладывая по 4, 6, 8 и даже 10 активных сторон в одной впадине. Одновременно этим достигается экономия на изоляционном материале и лучшее использование сечения впадины. С другой стороны, нельзя итти в этом отношении слишком далеко, чтобы отдельные проводники впадины при коротком замыкании не занимали слишком различного положения в магнитном поле (см. выше). Последнее обстоятельство приводит к практическому требованию, чтобы общий объем тока во всех проводниках, лежащих в одной впадине, не превышал 900—1000 ампер, о чем мы говорили уже при рассмотрении обмоток. При трудных условиях коммутации берут всего две активные стороны во впадине.

ж) Со стороны обмоток предъявляется требование, чтобы обмотка была совершенно симметричной. Как при петлевых, так и при волновых обмотках рекомендуется устройство эквипотенциальных соединений.

Эквипотенциальные соединения дают возможность при случайной несимметрии обмотки или магнитного поля уравнительным токам течь внутри машины, не загружая добавочно щетки. К тому же при магнитной несимметрии уравнительные токи через эквипотенциальные соединения действуют выравнивающим образом на магнитные поля. Число уравнительных соединений у больших машин с трудными условиями коммутации делают равным числу впадин. При меньших машинах с петлевой обмоткой делают число соединений по меньшей мере два на одно междуполюсное пространство, то-есть около 15 на одну пару полюсов.

з) Для уменьшения реактивной эл.-дв. силы выгодно взять меньшим число витков в отдельной катушке, что ведет к увели-

чению числа коллекторных пластин. Обычное число коллекторных пластин на один полюс берется от 24 до 54.

и) Щетки почти без исключения берутся угольные, благодаря их большему переходному сопротивлению, что выгодно для коммутации, так как уменьшает токи короткого замыкания. Угольные щетки хороши еще тем, что их контактные поверхности легко прирабатываются к поверхности коллектора.

Среднюю плотность тока под щетками обычно стараются держать в следующих пределах:

1. Металлические щетки.

Медные.

Нормальная плотность тока s_u = от 10 до 25 $^{ампер}/_{см^2}$, при чем падение напряжения в переходном слое получается ΔP = от 0,017 до 0,03 вольт.

Максимально допустимая плотность тока для этих щеток

$s_{u\,max}$ = ок. 40 $^{ампер}/_{см^2}$, при $\Delta P = 0{,}04$ вольт.

Щетки Будро.

s_u = от 15 до 30 $^{ампер}/_{см^2}$, при ΔP = от 0,06 до 0,11 вольт.

$s_{u\,max}$ = ок. 50 $^{ампер}/_{см^2}$, при $\Delta P = 0{,}15$ вольт.

Бронсколь.

s_u = от 20 до 30 $^{ампер}/_{см^2}$, при ΔP = ок. 0,2 вольт.

$s_{u\,max}$ = до 40 $^{ампер}/_{см^2}$, при ΔP = ок. 0,2 вольт.

2. Угольные и графитовые щетки.

Очень мягкие щетки.

s_u = от 8 до 11 $^{ампер}/_{см^2}$, при ΔP = от 0,40 до 0,60 вольт.

$s_{u\,max}$ = до 20 $^{ампер}/_{см^2}$, при $\Delta P = 0{,}70$ вольт.

Мягкие щетки.

s_u = от 6 до 10 $^{ампер}/_{см^2}$, при ΔP = от 0,55 до 0,70 вольт.

$s_{u\,max}$ = до 15 $^{ампер}/_{см^2}$, при $\Delta P = 0{,}90$ вольт.

Средней твердости щетки.

s_u = от 5 до 7 $^{ампер}/_{см^2}$, при ΔP = от 0,9 до 1,1 вольт.

$s_{u\,max}$ = до 11 $^{ампер}/_{см^2}$, при ΔP = 1,2 вольт.

Очень твердые щетки.

s_u = от 4 до 6 $^{ампер}/_{см^2}$, при ΔP = от 1,2 до 1,5 вольт.

$s_{u\,max}$ = до 9 $^{ампер}/_{см^2}$, при ΔP = 1,6 вольт.

3. Металлическо-угольные щетки разных марок.

Медно-угольные.

s_u = от 15 до 20 $^{ампер}/_{см^2}$, при ΔP = от 0,5 до 0,8 вольт

$s_{u\,max}$ = до 30 $^{ампер}/_{см^2}$, при ΔP = от 0,7 до 1,2 вольт.

Морганитовые.

s_u = от 5 до 12 $^{ампер}/_{см^2}$, при ΔP = от 0,9 до 1,1 вольт.

$s_{u\,max}$ = до 15 $^{ампер}/_{см^2}$, при ΔP = от 1,1 до 1,2 вольт.

} Смотря по марке.

Означенные цифры дают средние величины плотностей тока под щетками.

Для контактных колец, где условия работы более благоприятны, допускают бо́льшую плотность тока на 30—50%.

к) Кроме электрических условий для безъискровой работы должны быть выполнены некоторые условия чисто механического характера.

1) Конструкция системы щеткодержателей должна быть настолько прочной, чтобы не было ее дрожания и не нарушался контакт между поверхностями щетки и коллектора при вращении машины. Нажим щетки на коллектор рекомендуется в 0,13—0,25 $^{кг}/_{см^2}$.

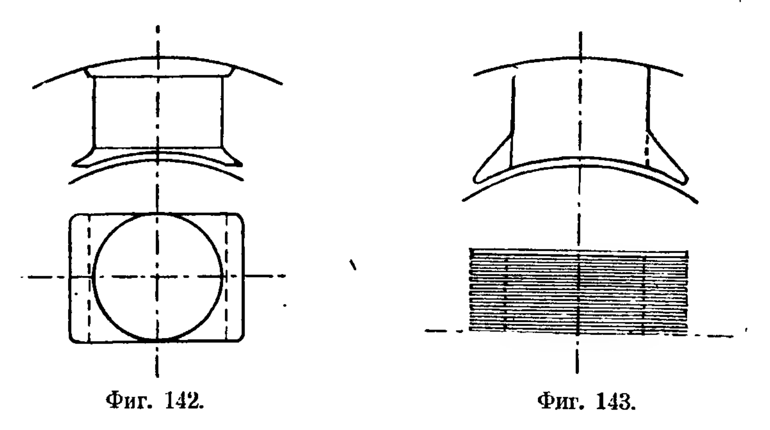
2) Окружность коллектора должна быть цилиндрическая, геометрически правильная; коллекторные пластины должны сидеть плотно.

3) Изоляционные прослойки между коллекторными пластинами не должны выдаваться над поверхностью пластин, и износ их должен происходить не медленнее, чем меди коллектора: иначе щетки, проходя по выступающим изоляционным прослойкам, будут подскакивать и искрить.

4) Конструкция всего коллектора должна быть спроектирована так, чтобы вентиляция была достаточно сильная и чтобы от нагревания коллектора не получалось выпучивания коллекторных пластин.

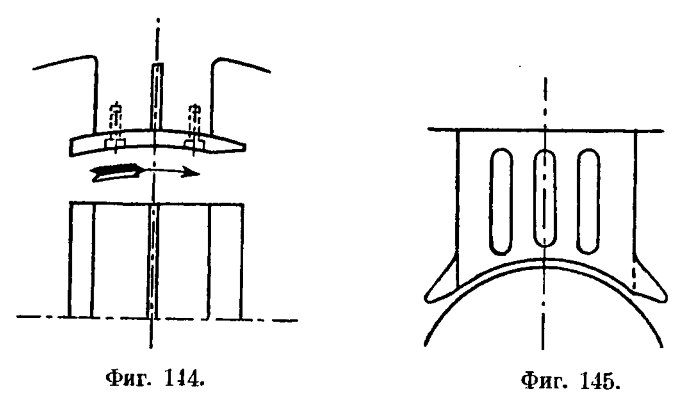
8. Особые конструкции полюсов и полюсных башмаков для получения хорошей коммутации.

Для создания лучших условий коммутации прибегают иногда к специальным конструкциям при устройстве полюсов. Целью



Фиг. 142. Фиг. 143.

всех этих конструкций является увеличение сопротивления поперечному потоку реакции якоря (особенно на концах полюсных



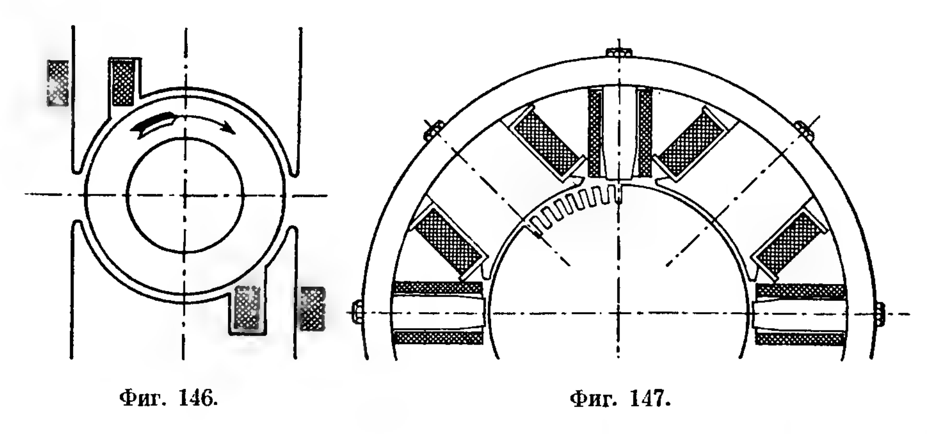
Фиг. 144. Фиг. 145.

башмаков), искажающему главное поле и ухудшающему этим условия коммутации. Некоторые из этих конструкций показаны на фиг. 142—146.

Последняя конструкция (фиг. 146), предложенная Swinburne'ом (не нашедшая, впрочем, практического распространения) снабжена добавочной последовательной обмоткой, имеющей целью несколько скомпенсировать ослабление поля под набегающей частью полюса.

9. Дополнительные полюса и компенсационные обмотки.

Дальнейшим средством для создания хорошей коммутации являются дополнительные полюса и компенсационные обмотки. Первые настолько вошли теперь в употребление, что нормальным типом машины постоянного тока в настоящее время являются машины с дополнительными полюсами.



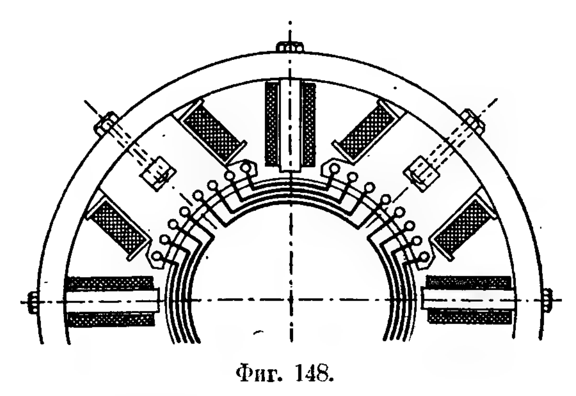
Фиг. 146. Фиг. 147.

Дополнительные полюса (см. фиг. 147) располагаются между главными полюсами и служат для создания необходимого коммутирующего поля в зоне коммутации. Щетки в этом случае обычно располагаются строго по геометрической нейтрали.

Так как, как это видно из выражения для величины коммутирующего поля (выражение 256), последнее должно изменяться пропорционально нагрузке (пропорционально AS), то обмотка возбуждения дополнительных полюсов включается последовательно с обмоткой якоря.

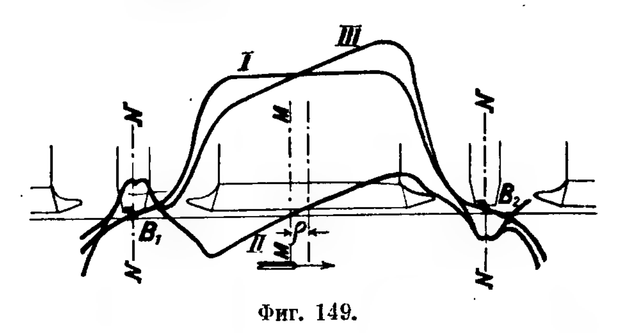
Иногда для компенсации действия реакции по всему якорю употребляются еще специальные компенсационные обмотки. Компенсационные обмотки располагаются равномерно во впадинах, устроенных в железе полюсных башмаков, как показано на фиг. 148. По проводникам компенсационной обмотки посылается ток

в направлении, обратном току, текущему по противолежащим проводникам обмотки якоря. Число ампер-проводников компен-



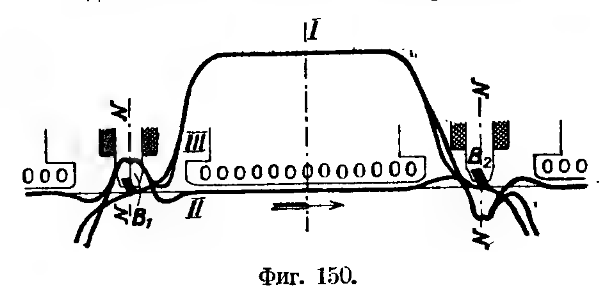
Фиг. 148.

сационной обмотки подбирается равным числу ампер-проводников якорной обмотки. Очевидно, для того, чтобы это равенство, а



Фиг. 149.

следовательно, и точная компенсация оставались неизмененными при переменной нагрузке, необходимо компенсационную обмотку включить последовательно с обмоткой якоря.



Фиг. 150.

Кривые распределения магнитных полей по якорю для машин (генераторов) с дополнительными полюсами показаны на фиг. 149.

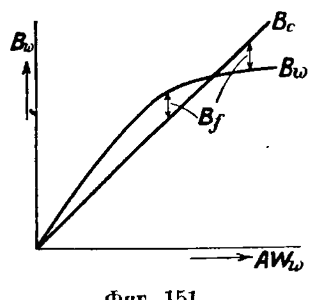
Кривая I показывает распределение главного магнитного поля (магнитной индукции), созданного обмоткой возбуждения главных полюсов.

Кривая II дает суммарное поле реакции якоря и дополнительных полюсов. Наконец кривая III показывает распределение результирующего поля от сложения двух предыдущих полей.

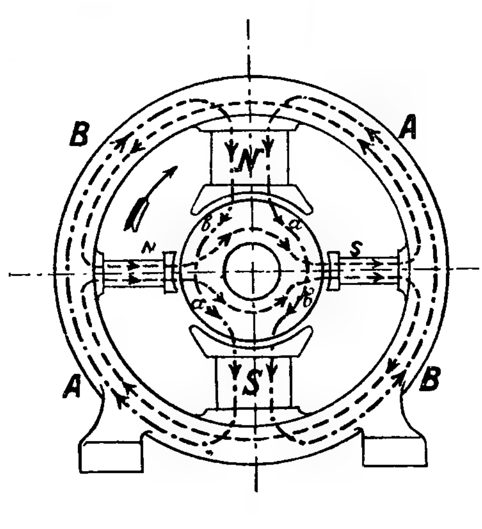
На фиг. 150 показано распределение поля для случая, когда, кроме дополнительных полюсов, имеется еще компенсационная обмотка. На этой фигуре кривая II обозначает суммарное поле реакции якоря, компенсационной обмотки и дополнительных полюсов.

10. Магнитные потоки в машинах с дополнительными полюсами.

При расчете дополнительных полюсов необходимо стремиться к тому, чтобы кривая намагничивания магнитной цепи дополнительных полюсов по возможности возрастала прямолинейно, т.-е. не доходила до области насыщения, иначе легко можно при малых нагрузках получить перекоммутирование, а при больших недокоммутирование машины (см. фиг. 151), результатом



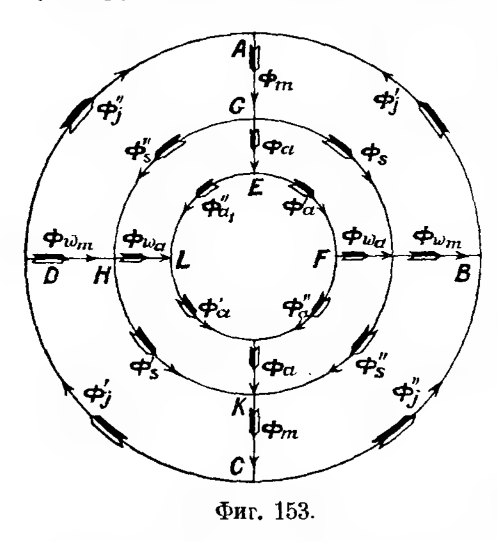
Фиг. 151.



Фиг. 152.

чего может появиться искрение на коллекторе. На фиг. 151 кривая B_w представляет собой кривую намагничивания цепи дополнительных полюсов, кривая же B_c — изменение коммутирующего поля, необходимое для правильной коммутации. Разностное поле B_f и может явиться причиной искрения.

Рассмотрим прохождение магнитных потоков, создаваемых дополнительными полюсами. На фиг. 152 показаны на двухполюсной машине раздельно магнитные потоки, создаваемые как главными полюсами, так и дополнительными, которые существовали бы, если бы были отдельно возбуждены или только одни или только другие полюса. При малых насыщениях результирующие потоки в отдельных частях получаются путем наложения одних потоков на другие. Схематическое распределение суммарных потоков для этого случая показано на фиг. 153. В силу условий симметрии распределение потоков в 1 и 3 квадрантах должно быть симметрично, равным образом и в квадрантах 2 и 4 симметрично между собой.



Фиг. 153.

Изложенным определяется распределение магнитных потоков в машине с добавочными полюсами при числе добавочных полюсов, равном числу главных полюсов машины. Как мы видели, в этом случае частичный поток, создаваемый дополнительными полюсами, выходя из одного дополнительного полюса, возвращается через другой дополнительный полюс.

В случае, если мы имеем число дополнительных полюсов в два раза менее числа главных полюсов, что иногда делается в целях экономии, поток, создаваемый каким-нибудь дополнительным полюсом, замыкается через соседние главные магнитные полюса [1]).

[1]) Число дополнительных полюсов делается иногда в два раза меньше чем число главных полюсов. Очевидно, это возможно, и работа такой машины получается настолько же удовлетворительной, как и при числе дополнительных полюсов, равном числу главных полюсов, для чего следует лишь усилить дополнительные полюса настолько, чтобы их поле создало в одной активной стороне коммутируемой катушки эл.-дв. силу, достаточную для компенсации реактивной эл.-дв. силы, индуктированной полями рассеяния в обеих активных сторонах этой катушки.

11. Потоки рассеяния в машинах с дополнительными полюсами.

Когда мы говорили о магнитном рассеянии главных полюсов, мы отмечали, что величина рассеяния главных полюсов при нагрузке увеличивается вследствие увеличения намагничивающих ампер-витков, идущих на покрытие действия реакции якоря, а также омического падения напряжения при нагрузке. Увеличение намагничивающих ампер-витков вызывает увеличение магнитодвижущей силы рассеивающих поверхностей.

В еще большей степени это имеет место в дополнительных полюсах. В силу относительного расположения дополнительных полюсов и ампер-проводников якорной обмотки последняя действует на дополнительные полюса размагничивающим образом. Результирующие ампер-витки, создающие в дополнительных полюсах нужный поток, могут быть представлены в виде разности (на один полюс)

$$\frac{1}{2}(AW_w - \tau \cdot AS), \quad \ldots \ldots \ldots \quad (260)$$

где $^1/_2\,AW_w$ есть ампер-витки, создаваемые обмоткой дополнительных полюсов, а $^1/_2\,\tau AS$ — размагничивающие ампер-витки реакции якоря.

Указанные обстоятельства вызывают необходимость в большом числе ампер-витков, накладываемых на дополнительные полюса, несмотря на малую величину полезного потока их.

Это большое число ампер-витков обмотки возбуждения дополнительных полюсов вызывает большие потоки рассеяния, которые нормально в несколько раз превышают полезный магнитный поток дополнительных полюсов. Обычные величины коэффициента рассеяния дополнительных полюсов колеблются в пределах

$$\sigma_w = \text{от } 2 \text{ до } 4 \quad \ldots \ldots \ldots \quad (261)$$

Величину потока рассеяния дополнительных полюсов рассчитывают независимо от потоков рассеяния главных полюсов.

Метод расчета тот же самый, что мы применяли для нахождения потоков рассеяния главных полюсов, при помощи вычерчивания магнитных трубок и определения их магнитной проводимости. Для уменьшения потока рассеяния дополнительных полюсов выгодно всю обмотку возбуждения их сдвигать возможно ближе к якорю.

12. Расчет ампер-витков возбуждения машины с дополнительными полюсами.

а) Ампер-витки главных полюсов. Рассчитываются так же, как и для машин без дополнительных полюсов. Магнитный поток при нагрузке Φ_b рассчитывают, исходя из эл.-дв. силы (для генератора)

$$E_a = E_k + J_a (R_a + R_h) + 2\,\Delta P, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad (262)$$

где R_h есть сопротивление всех последовательных обмоток возбуждения, считая в том числе и обмотку дополнительных полюсов.

Влиянием искажения распределения магнитных потоков в ярме и других частях машины, вследствие наличия потока дополнительных полюсов, пренебрегаем, в силу его относительно малого значения. Важно лишь не допускать больших насыщений железа в местах, где проходит поток дополнительных полюсов (в ярме, в железе якоря и в машинах с половинным числом дополнительных полюсов в сердечниках главных магнитов).

б) Ампер-витки обмотки дополнительных полюсов.

Величина средней магнитной индукции коммутирующего поля нам известна (см. выраж. 256). Отсюда, выбрав размеры полюсных башмаков дополнительных полюсов (b_w — ширину и l_w — длину), можно определить полезный магнитный поток, входящий в якорь:

$$\Phi_{wa} = b_w \cdot l_w \cdot B_k \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad (263)$$

Рассчитав величину потока рассеяния отдельных поверхностей дополнительных полюсов, найдем величину магнитного потока в разных сечениях сердечника дополнительных полюсов и соответствующую магнитную индукцию.

Если число дополнительных полюсов равно числу главных полюсов, можно считать, что магнитный поток дополнительных полюсов замыкается только через дополнительные полюса. В силу малости насыщения железа (см. выше) по пути прохождения магнитных линий потока дополнительных полюсов, ампер-витками, необходимыми для прохождения потока дополнительных полюсов по железу, можно при расчете пренебречь. Это коснется и железа зубцов якоря под дополнительными полюсами в силу малости выбора насыщения и здесь.

Таким образом учитывают обычно только ампер-витки для преодоления сопротивления междужелезного пространства между дополнительными полюсами и якорем

$$1{,}6\, k_{1w}\, \delta_w\, B_k \quad \ldots\ldots\ldots \quad (264)$$

и ампер-витки для компенсации реакции якоря

$$\tau \cdot AS, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (265$$

что в сумме дает (на магнитную цепь из двух дополнительных полюсов)

$$AW_w \cong \tau \cdot AS + 1{,}6\, k_{1w}\, \delta_w\, B_k, \quad \ldots\ldots \quad (266)$$

где k_{1w} — коэффициент, учитывающий наличие зубцов под полюсами, определение которого указано при рассмотрении магнитной системы главных полюсов.

При половинном числе дополнительных полюсов в силу того, что поток дополнительных полюсов возвращается обратно через главные полюса, проходя под ними междужелезное пространство, к указанным в выражении (266) ампер-виткам приходится добавить ампер-витки на преодоление сопротивления междужелезного пространства под главными полюсами

$$0{,}8 \cdot k_1\, \delta\, B_{wl}, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (267)$$

и суммарные ампер-витки на один дополнительный полюс в этом случае будут равны:

$$\frac{1}{2} AW_w \cong \frac{1}{2} \tau AS + 0{,}8\, k_{1w}\, \delta_w\, B_k + 0{,}8\, k_1 \delta\, B_{wl} \quad \ldots \quad (268)$$

Дополнительные полюса (сердечники их) имеют длинную и узкую форму. Длину их (l_w) делают или равной длине главных полюсов (l_p) или несколько меньше, в зависимости от насыщения железа:

$$l_w = (\text{от } 0{,}7 \text{ до } 1)\, l_p \quad \ldots\ldots\ldots \quad (269)$$

Что касается ширины, таковую берут не уже

$$b_w \geqq b'_{щ}, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (270)$$

при чем ширину полюсного башмака b_w рекомендуется делать также не меньше полуторной ширины деления зубца:

$$b_w \geqq 1{,}5\, t_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (271)$$

Что касается междужелезного пространства под дополнительными полюсами, то его берут или равным (чаще) междужелезному пространству главных полюсов или несколько больше

$$\delta_w = (\text{от } 1 \text{ до } 2)\, \delta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (272)$$

Увеличение междужелезного пространства уширяет зону коммутации и делает коммутирующее поле несколько более устойчивым, хотя и увеличивает рассеяние. При трудных условиях (широкое регулирование числа оборотов) прибегают иногда к увеличению междужелезного пространства до 2δ. Полюсные башмаки дополнительных полюсов по краям обычно несколько скашивают, чтобы сделать поле под серединой полюса сильнее, что дает при некоторых условиях возможность больше приблизиться к прямолинейной коммутации.

Сдвиг щеток в машине с дополнительными полюсами против направления вращения дает возможность так же, как в машинах без дополнительных полюсов, несколько компаундировать машину, но к этому надо относиться очень осторожно, так как легко выйти при этом с коммутируемым пучком из зоны влияния поля дополнительного полюса и получить искрение машины. В двигателе сдвиг щеток против направления вращения машины ослабляет главное поле и ведет к увеличению числа оборотов. Здесь также легко может получиться искрение, и, кроме того, при сдвиге щеток с геометрической нейтрали может иногда наблюдаться явление так называемого качания двигателя, который в этом случае будет периодически то ускорять то замедлять свое число оборотов.

Что действительно при сдвиге щеток получается усиление или ослабление результирующего поля, легко можно установить, если начертить главные и дополнительные поля и определить величину результирующего поля для разных положений щеток.

Условия коммутации в машинах с дополнительными полюсами получаются значительно лучшими, чем в машинах без них, но все же величина реактивной эл.-дв. силы не может быть допущена чрезмерно большой, так как иначе возникает опасность, при резких изменениях в нагрузке, появления кругового огня по коллектору. Следовательно и здесь все меры, направленные к уменьшению этой эл.-дв. силы, являются уместными и целесообразными.

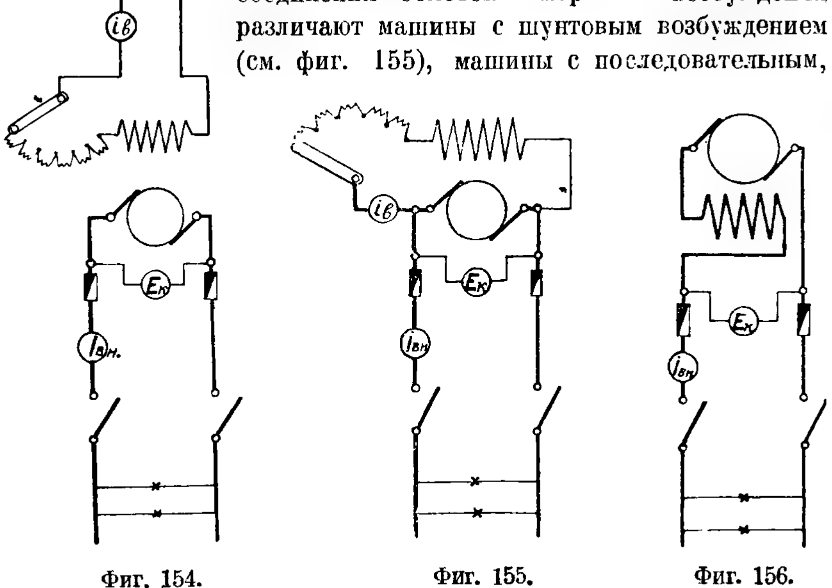
ГЛАВА ШЕСТАЯ.

ХАРАКТЕРИСТИЧНЫЕ КРИВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА.

1. Классификация машин постоянного тока по роду соединений обмотки якоря с обмотками магнитов.

Ток для возбуждения электрических машин постоянного тока может браться как от постороннего источника, так, в случае генератора, и от якоря самой же машины. В первом случае мы имеем так называемое независимое возбуждение (см. фиг. 154), во втором — самовозбуждение (см., напр., фиг. 155).

По взаимному расположению и способу соединения обмоток якоря и возбуждения различают машины с шунтовым возбуждением (см. фиг. 155), машины с последовательным,



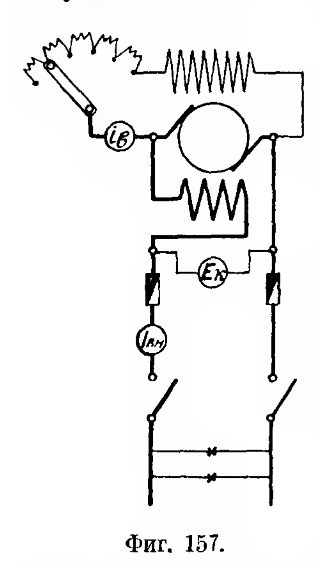
Фиг. 154. Фиг. 155. Фиг. 156.

или сериесным, возбуждением (фиг. 156) и, наконец, машины со смешанным, или компаундным, возбуждением (фиг. 157).

В зависимости от способа возбуждения эл. машины постоянного тока обладают различными свойствами. Кривые, которые характеризуют работу и свойства различных машин, называются характеристиками или характеристичными кривыми этих машин.

2. Генератор с независимым возбуждением.

Схема соединений такого генератора дана на фиг. 154. Характерным для генераторов с независимым возбуждением, получающих ток от постороннего источника тока с постоянным напряжением, является то, что ток в обмотке возбуждения этих генераторов при любых режимах работы остается постоянным. Это обстоятельство имеет место всегда, если мы сами не будем изменять, „регулировать", ток в обмотке возбуждения, меняя величину общего сопротивления цепи обмотки возбуждения включением большего или меньшего сопротивления в регулировочном реостате этой цепи. По свойствам к этим машинам близка следующая группа машин с самовозбуждение при шунтовом включении обмотки возбуждения (см. схему фиг. 155). У последних машин цепь обмотки возбуждения включена на полное напряжение якоря машины. Так как при постоянстве числа оборотов якоря, обычном у генераторов, и при отсутствии искусственного регулирования сопротивления цепи шунта падение напряжения в шунтовых динамомашинах с нагрузкой бывает относительно невелико, то изменение тока в цепи возбуждения таких машин при колебаниях нагрузки от нуля до полной также надо ожидать небольшое.



Фиг. 157.

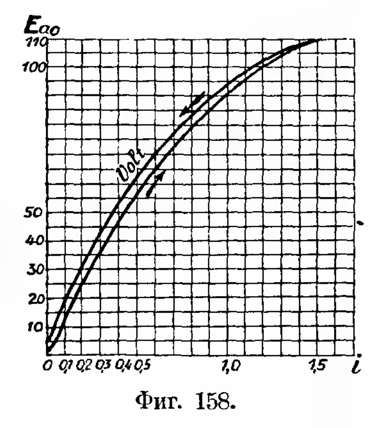
а) Характеристика холостого хода динамомашины с независимым возбуждением. Характеристикой холостого хода некоторого генератора $[E_a = f(i_в)]$ называется кривая, которая показывает, как изменяется индуктированная в якоре эл.-дв. сила (E_a) в зависимости от изменения

тока в обмотке возбуждения ($i_в$) при постоянном числе оборотов машины (n = const) и отсутствии нагрузки во внешней сети машины ($I_{вн} = 0$).

В свое время мы видели, что величина эл.-дв. силы, индуктированной в якоре, равняется:

$$E_a = \frac{p}{a} N \cdot \frac{n}{60} \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad . \; . \; . \; . \; (273)$$

Отсюда ясно, что при неизменной обмотке и конструкции машины и постоянном числе оборотов эл.-дв. сила будет изменяться прямо пропорционально магнитному потоку Φ, т.-е. характеристика холостого хода [$E_a = f(i_в)$] будет иметь совершенно такой же вид, как и кривая намагничивания машины (см. фиг. 158).



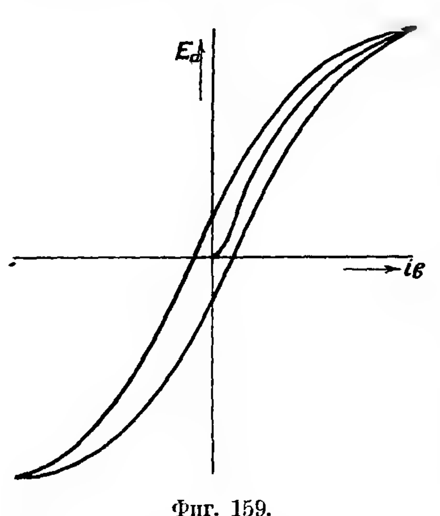
Фиг. 158.

Характеристика холостого хода характеризует магнитные свойства машины. Если мы начнем возбуждать машину, постепенно увеличивая значение тока в обмотке возбуждения, начиная от $i_в = 0$, то напряжение генератора начнет возрастать сначала прямолинейно, а затем, вследствие магнитного насыщения железа машины, более медленно, — характеристика получает загиб.

Необходимо отметить, что вследствие отсутствия тока в обмотке якоря и, следовательно, отсутствия падения напряжения в якоре напряжение на зажимах якоря, измеряемое вольтметром, в этом случае будет равняться полной эл.-дв. силе машины.

Если мы, достигнув некоторого максимального напряжения, будем уменьшать ток возбуждения, то заметим, что эл.-дв. сила генератора, уменьшаясь, будет принимать бо́льшие значения, чем при тех же токах возбуждения, но при увеличении возбуждения (см. верхнюю ниспадающую кривую, фиг. 158). Это обстоятельство объясняется явлением остаточного магнетизма (гистерезиса). Вследствие наличия того же остаточного магнетизма, при пуске в ход генератора еще до включения тока

в обмотку возбуждения мы на зажимах невозбужденного вращающегося генератора получим некоторую, хотя и небольшую, величину эл.-дв. силы — эл.-дв. силу остаточного магнетизма. Этим объясняется то, что обе ветви характеристики холостого хода на фиг. 158 не проходят через нулевую точку начала координат. Иногда случается, что при устройстве соединений машины обмотку возбуждения приключают так, что ток возбуждения, проходя по обмотке, создает магнитный поток, обратный потоку остаточного магнетизма. Для получения в этом случае потребного напряжения ток в обмотке возбуждения должен сначала уничтожить поток остаточного магнетизма, а затем уже создать нужный поток противоположного (потоку остаточного магнетизма) направления. При таких условиях начальная точка характеристики холостого хода легла бы ниже начала координат по отрицательному направлению оси ординат. Намеренно изменяя направление тока в обмотке возбуждения после прохождения двух ветвей кривой (фиг. 158), можно получить полную петлю гистерезиса (фиг. 159). Только наличие остаточного магнетизма делает возможным самовозбуждение машин, указанных в ближайших параграфах.



Фиг. 159.

Кривая характеристики холостого хода может быть получена путем расчета из кривой намагничивания. Способ вычисления кривой намагничивания указан при изложении магнитной системы.

При экспериментальном снятии характеристики $E_a = f\ (i_в)$, необходимо очень считаться с явлением гистерезиса и вести опыт при плавном повышении или понижении силы тока в обмотке возбуждения, не допуская скачков тока возбуждения то вверх то вниз. В последнем случае легко попадать с восходящей кривой на нисходящую и обратно, что даст совершенно неправильный вид характеристики холостого хода. В случае, если не удается точно поддерживать постоянным нормальное

число оборотов ($n_{норм}$) генератора, можно отсчет взять при другом числе оборотов (n') и затем сделать пересчет на нормальное, пользуясь соотношением:

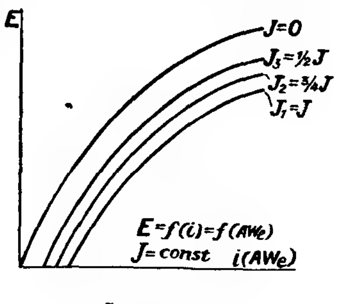
$$E_{a\ норм} = E' \cdot \frac{n_{норм.}}{n'} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (274)$$

б) Нагрузочная характеристика. Нагрузочная характеристика показывает изменение напряжения на зажимах генератора в зависимости от изменения тока возбуждения [$E_k = f(i)$] при постоянном числе оборотов (n = const) и некотором постоянном токе в якоре (I = const). Эта характеристика имеет вид, аналогичный кривой характеристики холостого хода, но при нанесении на одну диаграмму расположится ниже характеристики холостого хода. Последнее объясняется тем, что при нагрузке током якоря напряжение на зажимах машины (E_k) упадет и будет меньше эл.-дв. силы (E_a) при одном и том же токе возбуждения. Падение напряжения в якоре происходит по двум причинам:

1. Вследствие омического падения напряжения в обмотке якоря и в щетках (включая переходный слой между щетками и коллектором).

2. Вследствие воздействия реакции якоря на главное магнитное поле.

Так как, как омическое падение напряжения, так и реакция якоря увеличиваются с увеличением нагрузки якоря, то чем больше ток будет проходить по якорю, тем относительно ниже будет лежать соответствующая нагрузочная характеристика. Ряд таких нагрузочных кривых для различных сил тока показан на фиг. 160, на которой для сравнения также нанесена характеристика холостого хода.



Фиг. 160.

Так как на нагрузочных характеристиках также сказывается действие гистерезиса, то при практическом получении этих кривых обычно опыт начинают вести с некоторого максимального тока возбуждения, одинакового для всех нагрузочных характеристик, а затем идут вниз, уменьшая его. Для сравнения берут также нисходящую ветвь характеристики холостого хода.

При снятии как перечисленных характеристик, так и последующих, надлежит обращать большое внимание на нормальное положение щеток.

Нормальным положением щеток для машин реверсивных и машин, снабженных дополнительными полюсами, является такое, при котором коротко замкнутые витки располагаются строго по геометрической нейтрали.

Для машин без дополнительных полюсов, вращающихся только в одном направлении, выбирают как нормальное положение щеток наиболее выгодное в отношении коммутации. Как мы видели при рассмотрении условий коммутации, с этой стороны приходится у генераторов щетки сдвигать за физическую нейтраль по направлению вращения машины. У двигателей с этой же целью щетки сдвигают против вращения машины так, чтобы коротко замкнутые витки оказались в зоне первоначальной же полярности до физической нейтрали. Так как физическая нейтраль с изменением нагрузки сдвинется в ту или другую сторону, то для каждой нагрузки является наивыгоднейшим для коммутации свое особое положение щеток. В современных машинах требуется, чтобы коммутация была удовлетворительной для некоторого постоянного положения щеток. В качестве такого выбирают положение щеток, при котором машина, нагруженная от $\frac{1}{2}$ до $\frac{2}{3}$ нормальной нагрузки, работала бы наиболее удачно в отношении коммутации.

Установку щеток по геометрической нейтрали производят таким образом, что машину возбуждают и приводят во вращение без нагрузки. Затем начинают передвигать щетки, к которым (к двум разноименным полюсам) присоединен вольтметр. То положение щеток, при котором вольтметр покажет максимальное напряжение, и будет соответствовать положению коммутируемых витков по геометрической нейтрали, которая для холостого хода является и физической нейтралью.

Установку нейтральной зоны можно произвести и при неподвижной машине индуктивным способом. Поле слабо возбуждается от независимого источника тока. Щетки, к которым попрежнему присоединен вольтмер, сдвигаются до тех пор, пока вольтметр при изменении тока в обмотке возбуждения не перестанет давать отклонений. То положение, при котором такой вольтметр при

изменении тока возбуждения не дает никакого отклонения стрелки, и является положением нейтральной оси.

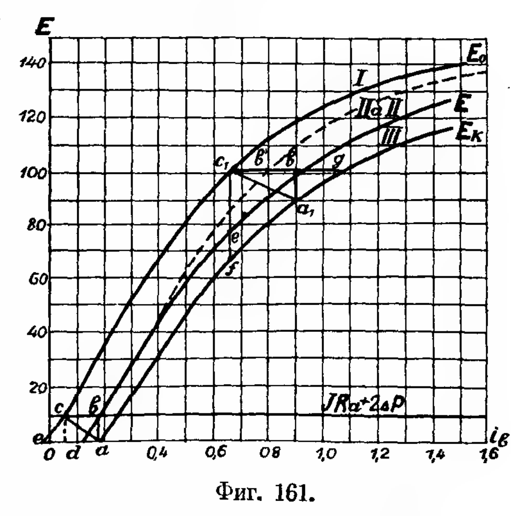
У машин с добавочными полюсами необходимо следить за правильным чередованием главных и вспомогательных полюсов. Если мы через N и S обозначим главные и через n и s вспомогательные полюса, то для генераторов чередование их должно происходить в следующей последовательности:

$$\overrightarrow{N - s - S - n},$$

где стрелка обозначает направление вращения проводников якорной обмотки.

При неправильном положении щеток легко можно получить меньшие значения напряжения при холостом ходе и при снятии нагрузочных кривых, при случайном же сдвиге щеток против направления вращения в генераторе можно получить компаундирование машины, при чем генератор может дать нагрузочную кривую, которая пойдет не ниже, а выше характеристики холостого хода. Последнее легко может случиться, если машину без добавочных полюсов, со щетками, установленными для определенного направления вращения, при испытании случайно заставят вращаться в обратном направлении.

Из нагрузочной характеристики легко можно получить так называемую внутреннюю нагрузочную характеристику. Как мы сказали выше, нагрузочная характеристика нормально располагается ниже характеристики холостого хода вследствие омического падения напряжения в якорной обмотке и щетках, с одной стороны, и размагничивающего действия реакции якоря на главное поле — с другой стороны. Так, если при некотором токе возбуждения ($i_в$) мы имеем при холостом ходе напряжение, определяемое точкой c_1 (см. фиг. 161),



Фиг. 161.

то при нагрузке и том же токе возбуждения генератор даст на своих зажимах меньшее напряжение, показанное на фиг. 161 точкой f, т.-е. мы имеем падение напряжения, представляемое отрезком c_1f. Из этого отрезка часть, отрезок ef, представляет собой омическое падение напряжения в обмотке якоря и в щетках, равное

$$I_a R_a + 2\Delta P \qquad (275)$$

Здесь I_a — сила тока в якоре, R_a — сопротивление якоря и $2\Delta P$ — падение напряжения в двух щетках положительного и отрицательного знаков.

Отрезок c_1e представляет собой уменьшение напряжения вследствие действия реакции якоря.

Омическое падение напряжения, пропорциональное току, при постоянной величине тока в якоре может быть принято постоянным, если не считаться, конечно, с изменением сопротивления якоря от нагревания. Это постоянное падение напряжения от омических сопротивлений изображено на фиг. 161 в виде прямой, проведенной параллельно оси абсцисс на расстоянии

$$ab = IR_a + 2\Delta P.$$

Если теперь к ординатам нагрузочной кривой (кривая III, фиг. 161) прибавить отрезки, равные ab, то получим кривую II, расположенную ниже характеристики холостого хода только на величину падения напряжения от реакции якоря машины. Эта характеристика (кривая II) и носит название внутренней нагрузочной характеристики генератора.

Как мы сказали, омическое падение напряжения представляется отрезком ab или равным ему отрезком cd. Для создания эл.-дв. силы, равной cd, идущей на компенсацию омического падения напряжения, требуется ток возбуждения, представляемый отрезком ed (соответствующий некоторым ампер-виткам возбуждения) [1]).

Кроме тока, необходимого для компенсации омического падения напряжения, нужно еще увеличить ток возбуждения для

---

[1]) В данном случае часть возбуждения (eo) идет фактически за счет магнитодвижущей силы остаточного магнетизма, другая же часть (od) представляет собой действительный ток, текущий в обмотке возбуждения и создающи вместе с остаточным магнетизмом нужные ампер-витки возбуждения.

того, чтобы скомпенсировать размагничивающее действие ампер-витков (AW_r) реакции якоря. При малых токах возбуждения величина тока, идущего на компенсацию действия реакции якоря, представляется отрезком cb или равным ему отрезком $da = \frac{AW_r}{W_n}$, где W_n — число витков обмотки возбуждения.

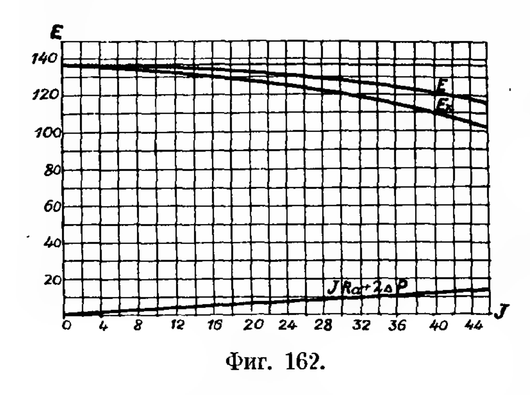
Если величина омического падения напряжения ab может быть принята постоянной, то величина размагничивающих ампер-витков с увеличением возбуждения машины является переменной. Действительно, действие реакции якоря складывается из действия размагничивающих (AW_g) и поперечно-намагничивающих (AW_q') ампер-витков. Первые при постоянном нагрузочном токе в якоре I зависят только от положения щеток. Если положение щеток постоянно, то и размагничивающие ампер-витки (AW_g) и, следовательно, ампер-витки возбуждения, идущие на компенсацию их, остаются постоянными. Что же касается ампер-витков (AW_q'), идущих на компенсацию размагничивающего действия поперечного поля, то таковые для прямолинейной части характеристики холостого хода, т.-е. пока железо магнитной системы не насыщено, равны нулю. Но, как только железо начинает насыщаться, ампер-витки AW_q' довольно быстро начинают увеличиваться. Таким образом размагничивающие ампер-витки реакции якоря $AW_r = AW_g + AW_q'$ не остаются постоянными, а растут с насыщением.

Если мы построим так называемый треугольник реакции якоря ($\triangle abc$ или $\triangle a_1b_1c_1$ фиг. 161), у которого одна сторона (ab или a_1b_1) представляет собой омическое падение напряжения, а другая (bc или b_1c_1) размагничивающие ампер-витки реакции якоря, то вершины этого треугольника расположатся на трех кривых: характеристике холостого хода (точка c), внутренней нагрузочной (точка b) и нагрузочной характеристике (точка a). Если принять величину реакции якоря (отрезок bc) постоянной, то, при передвижении отрезка bc вверх так, чтобы точка c все время скользила по характеристике холостого хода, точка b этого отрезка опишет пунктирную кривую IIa, расстояние которой по горизонтали (отрезок $b'b$ от кривой II) в некотором масштабе представит собой величину размагничивающих ампер-витков поперечной реакции якоря $\left(\frac{AW'_q}{W_n}\right)$. При приближенных исследованиях машин часто считают треугольник реакции якоря

неизменным, принимая величину реакции якоря b_1c_1 за постоянную и равную реакции якоря при нормальном напряжении генератора. Если бы мы стали теперь этот постоянный треугольник $a_1b_1c_1$ передвигать параллельно самому себе так, чтобы точка c_1 скользила по характеристике холостого хода, то точка a_1 описала бы нагрузочную характеристику. Эта графически найденная нагрузочная характеристика не будет вполне совпадать с действительной кривой.

При ненасыщенном железе мы получим слишком малые, а при большом насыщении железа — слишком большие значения напряжения E_k.

в) Внешняя характеристика. Большинство генераторов работает с переменной нагрузкой. При быстрых изменениях нагрузки не всегда возможно подрегулировать возбуждение так, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось без изменения. Поэтому к генераторам предъявляется общее требование, чтобы напряжение их при переменной нагрузке и постоянном возбуждении оставалось возможно постоянным. О качествах машины в этом отношении судят по внешней характеристике.



Фиг. 162.

Внешняя характеристика (фиг. 162) представляет собой зависимость напряжения машины от силы тока в якоре $[E_k = f(I)]$ при постоянном числе оборотов ($n = \text{const}$) и постоянном токе возбуждения ($i_в = \text{const}$). У шунтовых генераторов внешняя характеристика определяется часто не при постоянном токе возбуждения, а при постоянном сопротивлении цепи шунта ($r_{ц.ш} = \text{const}$). Как мы видим из кривой E_k (фиг. 162), падение напряжения в генераторе с нагрузкой изменяется не прямолинейно, а при больших нагрузках быстрее, чем по закону прямой линии. На той же фиг. 162 нанесено в виде прямой, проходящей через начало координат, омическое падение напряжения в якоре и щетках ($IR_a + 2\Delta P$). Здесь сделано некоторое допущение, так как в действительности падение напряжения ΔP при угольных щетках и больших нагрузках остается почти

постоянным. Здесь и в дальнейшем для упрощения приближенно принято, что общее омическое падение напряжения изменяется пропорционально току.

Если к ординатам кривой внешней характеристики (E_k) прибавить соответствующие величины омических падений напряжения, то получится так называемая внутренняя характеристика машины (кривая E), которая учитывает только падение напряжения от действия реакции якоря.

Внешняя характеристика позволяет определить как падение напряжения генератора при изменении нагрузки от нуля до определенной величины, так и повышение напряжения на зажимах при разгрузке машины от некоторой величины нагрузочного тока до нуля.

Падение напряжения обычно измеряется в процентах от нормального напряжения машины. Характерным для каждого генератора является падение напряжения при полной нагрузке, при чем возбуждение устанавливается так, чтобы без нагрузки машина дала нормальное напряжение.

Если по внешней характеристике мы имеем напряжение на зажимах генератора, при нагрузочном токе $I=0$, равное E_0 и при полной нагрузке ($I=I_{норм}$), равное $E_{кн}$, то процентное падение напряжения в генераторе будет равняться:

$$\varepsilon_a = \frac{E_0 - E_{кн}}{E_0} 100\% \quad \ldots \ldots \ldots (276)$$

С другой стороны, характерным для каждого генератора является повышение напряжения генератора при разгрузке генератора от полной величины до нуля, при чем возбуждение поддерживается такое, при котором машина с полной нормальной нагрузкой развивает нормальное напряжение. Повышение напряжения также обычно измеряется в процентах от нормального напряжения машины.

При напряжении генератора при полной нагрузке ($I=I_{норм}$), равной $E_{кр}$ и напряжении при холостом ходе ($I=0$), равном E_0, имеем процентное повышение напряжения:

$$\varepsilon_e = \frac{E_0 - E_{кр}}{E_{кр}} 100\% \quad \ldots \ldots \ldots (277)$$

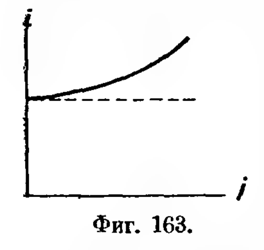
Нормальные величины изменения напряжения различных генераторов не должны выходить из следующих пределов:

ТАБЛИЦА 4.

Генераторы с независимым возбуждением	Изменение напряжения	Генераторы с самовозбуждением	Изменение напряжения
Без дополнит. пол. . .	8—12%	Без дополнит. пол. . .	15—20%
С дополнит. пол. . .	6—10%	С дополнит. пол. . .	10—15%
Турбогенераторы . .	5— 8%	Турбогенераторы . .	8—12%

В случае, если при испытании несколько меняется число оборотов, производится пересчет полученной величины напряжения на нормальное число оборотов.

г) Регулировочная характеристика. Так как в силу значительного увеличения стоимости машины нельзя устроить так, чтобы падение напряжения в генераторе было мало заметно, приходится с увеличением нагрузки регулировать машину для поддержания постоянного напряжения на зажимах, увеличивая ток в обмотке возбуждения. Кривая, которая показывает, насколько надо изменять силу тока возбуждения с увеличением тока в якоре [$i_в = f(I)$] при постоянном числе оборотов ($n = \text{const}$) для поддержания постоянного напряжения на зажимах генератора ($E_k = \text{const}$), называется регулировочной характеристикой (см. фиг. 163).

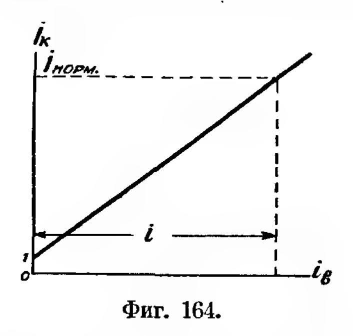


Фиг. 163.

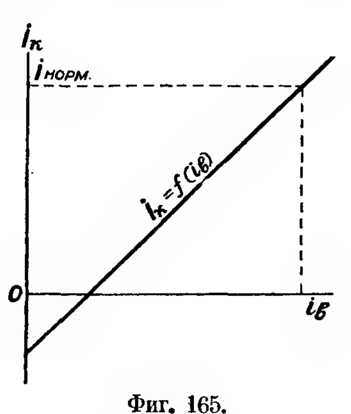
д) Характеристика короткого замыкания. Если замкнуть через амперметр на короткое зажимы якоря невозбужденного ($i_в = 0$) генератора, то под действием эл.-дв. силы остаточного магнетизма по якорю и амперметру потечет ток (I_k) — ток короткого замыкания. Если к действию остаточного магнетизма добавить еще действие небольшого числа ампер-витков возбуждения (пустить в обмотку малый ток $i_в$), сила тока в якоре увеличится. Кривая, представляющая собой изменение тока короткого замыкания в якоре в зависимости от изменения токе в обмотке возбуждения [$I_k = f(i_в)$] при постоянном числе оборотов ($n = \text{const}$), называется характеристикой короткого замыкания (см. фиг. 164). В силу остаточного магнетизма характеристика проходит несколько выше начала координат. При

очень большом остаточном магнитизме в якоре только под действием эл.-дв. силы остаточного магнетизма может пойти слишком большая сила тока, даже больше тока нормальной нагрузки.

В этом случае, во избежание перегрева машины, рекомендуется перемагнитить машину, пустив ток в обмотку возбуждения в обратном направлении. Характеристика короткого замыкания в этом случае пойдет так, как показано на фиг. 165. В силу малых насыщений, так как для создания больших токов короткого замыкания достаточны бывают очень малые эл.-дв. силы, машина при опыте короткого замыкания работает на прямолинейной части кривой намагничивания, и сама характеристика короткого замыкания представляется прямой линией. Для совсем малых насыщений (малые значения I_k) это не совсем точно, так как вследствие явления гистеризиса и неустойчивости магнитного состояния здесь кривая $I_k = f(i_в)$ имеет обычно загиб к началу координат [также как имеет такой же загиб и кривая $\Phi = f(i_в)$ или $E_k = f(i_в)$]. При получении этой характеристики амперметр и проводники для замыкания на короткое якоря необходимо брать с возможно малыми сопротивлениями.



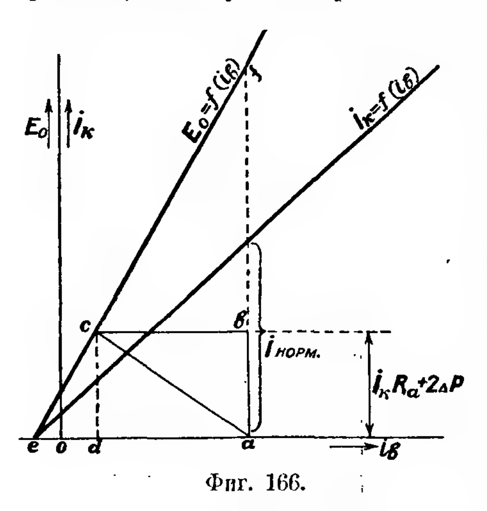
Фиг. 164.



Фиг. 165.

Характеристика короткого замыкания вместе с характеристикой холостого хода дают возможность легко определить величину реакции якоря. Действительно, наносим на одной и той же диаграмме (фиг. 166) нижнюю часть характеристики холостого хода и характеристику короткого замыкания. Обе характеристики необходимо сместить так, чтобы они пересекались в одной точке (с) на оси абсцисс. Если мы хотим найти треугольник реакции якоря для некоторого тока, например $I_{норм}$, то, отложив величину этого тока по характеристике короткого замыкания, найдем

необходимые ампер-витки возбуждения для создания тока короткого замыкания, равного $I_k = I_{норм}$. Эти ампер-витки (точнее ток возбуждения) представляются отрезком *ea*. Напряжение на зажимах машины при коротком замыкании равно нулю (пренебрегаем падением напряжения в амперметре и соедин. проводах); между тем при холостом ходе этот ток возбуждения (*ea*) создал бы в якоре эл.-дв. силу, представляемую отрезком *af*. Часть (*ab*) этой эл.-дв. силы расходуется на компенсацию омического падения напряжения в якоре и щетках $I_н R_a + 2\Delta P$ (можем вычислить), остальная часть теряется вследствие размагничивающего действия реакции якоря. В силу этих обстоятельств, проведя на расстоянии, равном $I_н R_a + 2\Delta P$ линию, параллельную оси абсцсс, до пересечения с характеристикой холостого хода (E_0), мы найдем ампер-витки *ed*, идущие на компенсацию омического падения напряжения в якоре и щетках, а остаток ампер-витков (от *ea*), равный *da*, или равные ему ампер-витки *cb* представят собой ампер-витки, идущие на компенсацию действия реакции якоря. Таким образом $\triangle abc$ и будет искомый нами треугольник реакции якоря. Надо, конечно, иметь в виду, что полученная таким образом реакция якоря будет несколько меньше реакции, действующей при полном напряжении машины, так как здесь мы имеем дело с малыми насыщениями железа и потому размагничивающее действие поперечного потока реакции якора в этом случае равно нулю, и мы учитываем только размагничивающие ампер-витки AW_g.



Фиг. 166.

3. Шунтовой генератор с самовозбуждением.

Если вместо того, чтобы ток для возбуждения брать от постороннего источника тока, взять его из якоря самого генератора и присоединить цепь возбуждения к зажимам якоря (см.

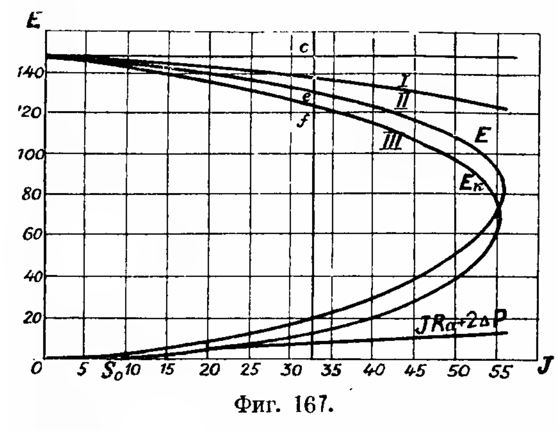
схему фиг. 155) параллельно с внешней сетью (как говорят, „в шунт“), получим шунтовой генератор, работающий с самовозбуждением. Разница такого генератора с только что описанным (с генератором с независимым возбуждением), как мы уже указывали, весьма незначительна и будет заключаться в том, что у шунтового генератора при отсутствии регулирования шунтовым реостатом с увеличением тока в якоре и понижением напряжения на его зажимах тем самым будет понижаться напряжение на зажимах цепи возбуждения, а вместе с тем будет уменьшаться и ток в этой цепи. Так как падение напряжения в шунтовых генераторах весьма невелико (см. табл. 4), то влияние падения напряжения в якоре будет мало сказываться на изменении свойств описанной выше машины при переходе ее от работы с независимым возбуждением к работе с самовозбуждением.

а) Характеристика холостого хода шунтового генератора имеет вид, аналогичный характеристике холостого хода генератора с независимым возбуждением. Влияние тока, протекающего в это время по якорю (1 — 3% от нормального тока якоря), настолько незначительно, что им можно пренебречь. Очевидно, в машинах с самовозбуждением без помощи постороннего источника тока нельзя перемагнитить машины и получить полный шлейф гистерезиса, показанный на фиг. 159. Равным образом при неправильном включении шунтовой обмотки, когда она вместо усиления поля остаточного магнетизма будет ослаблять его, машина не сможет возбудиться и не даст нужного напряжения. Также, если машина вследствие каких-либо причин, потеряв свой остаточный магнетизм, размагнитится, она уже не сможет сама возбудиться, и для ее нового возбуждения потребуется сначала намагнитить полюса от постороннего источника тока.

б) Нагрузочные характеристики имеют совершенно такой же вид, как у генератора с независимым возбуждением.

в) Внешняя характеристика снимается у шунтового генератора с самовозбуждением при постоянном сопротивлении цепи шунта ($R_ш$ = const). В силу этого падение кривой внешней характеристики (см. кривую *III*, фиг. 167) получается бóльшим, чем у машины с независимым возбуждением. Для сравнения на той же фигуре нанесена внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением (кривая *I*). Большее падение на-

пряжения у генераторов с самовозбуждением отмечено и в табл. 4. Большее падение напряжения объясняется здесь тем, что в машинах с самовозбуждением вместе с падением напряжения на зажимах якоря уменьшается и ток в обмотке возбуждения.



Фиг. 167.

Из кривой внешней характеристики (кривая *III*, фиг. 167) мы видим, что при достижении определенной силы тока в якоре, так называемой „критической" силы тока, кривая имеет загиб назад и при дальнейшем уменьшении сопротивления внешней цепи идет обратно (напряжение падает при одновременном уменьшении силы тока). При коротком замыкании зажимов якоря внешняя характеристика перерезывает ось абсцисс в точке s_0. Если бы машина не имела остаточного магнетизма, кривая при коротком замыкании пришла бы в начало координат. У нормальных машин критическое значение тока получается при величинах, значительно превосходящих нормальную нагрузку машины. Из кривой *III* (фиг. 167) мы видим также, что для шунтовых генераторов полное короткое замыкание не представляет такой большой опасности перегорания обмотки, как для других машин,— обстоятельство, сказывающееся тем сильнее, чем больше реакция якоря.

Также, как у генераторов с независимым возбуждением, и здесь, зная омическое падение напряжения для разных нагрузок, по кривой внешней характеристики можно построить внутреннюю характеристику (см. кривая *II*, фиг. 167). Для некоторой нагрузки отрезок *cf* представляет полное падение напряжения в генераторе, отрезок *ef*—падение напряжения от омического сопротивления и отрезок *ce*—уменьшение напряжения от действия реакции якоря и уменьшения тока возбуждения. Внешняя характеристика у шунтового генератора является не однозначной кривой и имеет для определенной силы тока возбуждения два значения напряжения в верхней и нижней части кривой.

Процентное падение и повышение напряжения у шунтовых генераторов определяется таким же образом, как и у генераторов с независимым возбуждением. Определение здесь ведется при постоянном сопротивлении в цепи шунта ($R_ш$ = const), благодаря чему падение и повышение напряжения получаются у шунтовых генераторов с самовозбуждением несколько бо́льшими, чем у генераторов с независимым возбуждением.

г) Регулировочная характеристика имеет такой же вид, как и регулировочная характеристика генератора с независимым возбуждением.

д) Характеристика короткого замыкания должна сниматься при независимом возбуждении, почему и имеет вид совершенно такой же, как у машины с независимым возбуждением.

4. Генератор с последовательным возбуждением.

Генераторы с последовательным возбуждением (см. схему на фиг. 156) в силу резкого изменения у них напряжения при изменении нагрузки (см. дальше) в настоящее время не имеют применения в обычной практике. Рассмотрение их свойств имеет интерес лишь в силу того, что последовательная обмотка возбуждения применяется в ряде машин параллельно с шунтовой обмоткой и придает этим машинам некоторые свойства, характерные для генераторов с последовательным возбуждением.

а) Характеристика холостого хода. Характеристику холостого хода у этих машин можно получить только при независимом возбуждении, при чем она будет иметь вид совершенно такой же, как у всех генераторов с независимым возбуждением.

б) Нагрузочные характеристики. Здесь не может быть нагрузочных характеристик, так как ток в якоре и обмотке возбуждения один и тот же и его нельзя регулировать в одной обмотке независимо от тока в другой обмотке. Единственная возможность и здесь для получения нагрузочных характеристик — устроить независимое возбуждение.

в) Внешняя характеристика является самой характерной для свойств последовательного генератора. Так как весь ток якоря в последовательном генераторе проходит через обмотку возбуждения, то с увеличением нагрузки машины должна увели-

чиваться в нем как эл.-дв. сила (E_a), так и напряжение на его зажимах (E_k). На фиг. 168 кривая I есть характеристика холостого хода, кривая III — внешняя характеристика и кривая II — внутренняя характеристика, полученная из внешней характеристики путем прибавления к ней величины омического падения напряжения

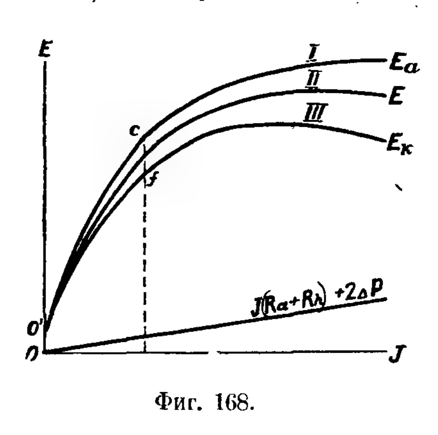
$$I(R_a + R_h) + 2\Delta P, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (278)$$

где R_h — сопротивление последовательной обмотки возбуждения.

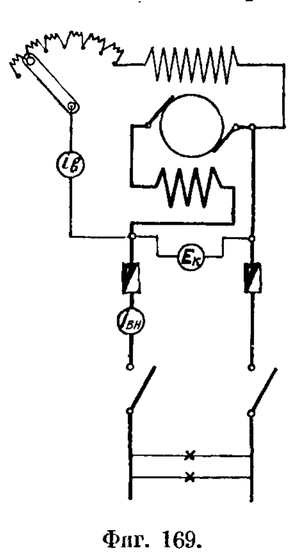
При экспериментальном снятии внешней характеристики число оборотов, конечно, поддерживается постоянным.

5. Генератор со смешанным возбуждением (компаунд).

Схема соединений компаундного генератора показана на фигуре 157. По способу присоединения шунтовой обмотки различают компаундные генераторы с „коротким“ шунтом (см. схему фиг. 157) и с „длинным“ шунтом (см. схему фиг. 169). В силу малого омического



Фиг. 168.

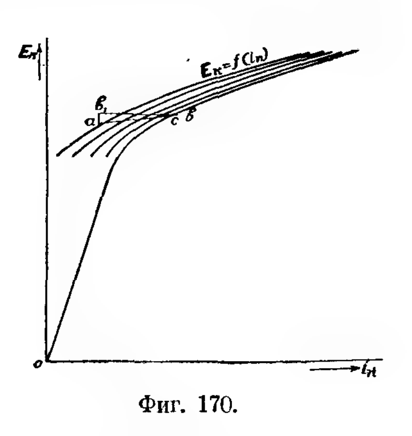


Фиг. 169.

сопротивления компаундной обмотки существенной разницы в свойства компаундной машины тот или другой способ присоединения шунтовой обмотки не вносит.

а) Характеристика холостого хода одинакова с характеристикой холостого хода шунтового генератора, так как последовательная обмотка при холостом ходе остается без тока.

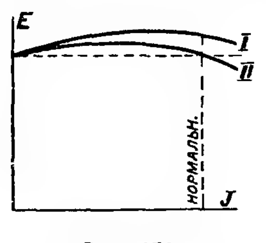
б) Нагрузочные характеристики имеют вид, аналогичный с характеристикой холостого хода, но располагаются обычно выше характеристики холостого хода (см. фиг. 170) в противоположность нагрузочным характеристикам шунтового генератора. Последнее объясняется тем, что в компаундных генераторах магнитный поток при нагрузке создается не только током в шунтовой обмотке возбуждения, но и током компаундной (последовательной) обмотки. Следовательно при одном и том же токе возбуждения в шунте мы в компаундном генераторе при нагрузке получим бо́льшую эл.-дв. силу, чем при холостом ходе. При достаточно большом токе и числе витков последовательной обмотки, несмотря на падение напряжения в якоре вследствие омического сопротивления и действия реакции якоря, мы получим напряжение на зажимах такого генератора большее, чем при холостом ходе при том же токе возбуждения в шунтовой обмотке.



Фиг. 170.

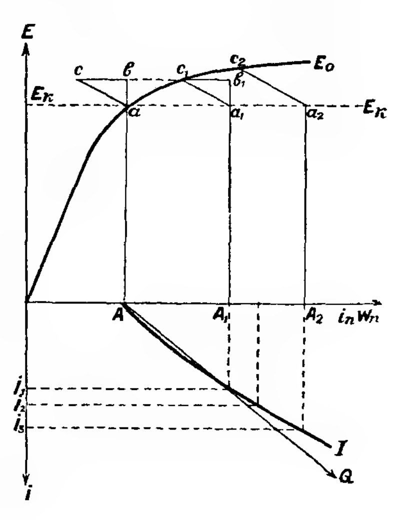
в) Внешняя характеристика получается так же, как у шунтового генератора, но с нормально присоединенной компаундной обмоткой. При помощи компаундной обмотки возбуждение в генераторе усиливается пропорционально нагрузке. Выбирая число витков последовательной обмотки, можно устроить так, что, с одной стороны, будет скомпенсировано размагничивающее действие реакции якоря и, с другой стороны, индуктированная эл.-дв. сила будет возрастать приблизительно пропорционально омическому падению напряжения в машине. Тогда мы получим приблизительно постоянное напряжение на зажимах генератора. В некоторых случаях требуется поддержать постоянное напряжение не на зажимах генератора, а где-нибудь в конце линии у отдаленного питательного пункта. Тогда число витков компаундной обмотки подбирают так, чтобы действие этой обмотки скомпенсировало не только реакцию и омическое падение напряжения самой машины, но и омическое падение напряжения в питательной линии. В соответствии с тем, будем ли мы ком-

паундировать машину на постоянное напряжение на зажимах самой машины или на постоянное напряжение в конце питательной линии, получим для внешней характеристики компаундного генератора или кривую вида *II* или кривую вида *I* (см. фиг. 171). В последнем случае отрезок ординаты между кривыми *I* и *II* должен итти на компенсацию омического падения в линии и равняется $I_л R_в$, где $I_л$ — ток в линии, а $R_в$ — омическое сопротивление линии. Как мы видим из кривых, точное компаундирование (вследствие насыщения железа) возможно только для одной определенной нагрузки (напр. нормальной). Для меньших нагрузок тогда получим перекомпаундирование машины (повышение напряжения), а для бо́льших нагрузок, чем выбранная нами (в данном случае нормальная), недокомпаундирование (понижение напряжения).



Фиг. 171.

Пользуясь характеристикой холостого хода и треугольником реакции якоря, можно определить потребное число витков последовательной обмотки для компаундирования генератора при определенной силе тока. На чертеже (фиг. 172) наносим характеристику холостого хода (E_o). Вычисляем треугольник реакции якоря *abc*, стороны которого представляют: $ab = I(R_a + R_h) + 2\Delta P$ омическое падение напряжения в обмотках якоря и компаундной, а также и в щетках, и сторона *bc*, равная AW_a, — ампер-витки реакции якоря. Реакцию якоря и омическое падение напряжения приближенно считаем изменяющимися пропорционально нагрузочному току машины. Тогда сторона *ac* треугольника реакции якоря будет изменяться пропорционально току в якоре, оставаясь всегда параллельной самой себе. Пусть нормальное напряжение машины E_k, на которое мы хотим компаундировать гене-



Фиг. 172.

ратор, представляется точкой a характеристики холостого хода. Через точку a проводим горизонталь $E_k E_k$. От точки a вверх наносим вычисленный нами треугольник реакции якоря. Для нахождения ампер-витков, необходимых для компаундирования генератора при токе I, сдвигаем треугольник abc вправо так, чтобы точка a оставалась на горизонтали $E_k E_k$ (займет новое положение a_1), а точка c попала на характеристику холостого хода (в точку c_1). Тогда отрезок aa_1 или равный ему отрезок AA_1 определит искомые ампер-витки компаундной обмотки. Поделив их на силу тока I_1 в компаундной обмотке, найдем число витков последней. Для всякого другого тока I_2 сторона треугольника реакции якоря представится некоторой другой прямой a_2c_2, пропорционально увеличенной, но имеющей то же направление, что и сторона ac или a_1c_1. Положение ее находится так же, как и положение стороны a_1c_1. Ампер-витки, потребные для компаундирования в этом случае, представятся отрезком aa_2 или равным ему отрезком AA_2.

Если мы нанесем внизу диаграммы, откладывая по отрицательной ординате ток в якоре, зависимость ампер-витков компаундной обмотки, необходимых для полного компаундирования машины, от силы тока в якоре, то увидим, что эта зависимость не прямолинейна. Выбрав определенное число витков последовательной обмотки возбуждения, таким образом скомпаундируем машину полностью только при одной определенной силе тока в якоре, о чем мы уже говорили. Прямая Q (фиг. 172) показывает действительные ампер-витки компаундной обмотки, которые мы получим при разных нагрузках, установив определенное число витков компаундной обмотки на магнитах.

6. Машина постоянного тока как двигатель.

Если вместо того, чтобы приводить во вращение каким-нибудь двигателем динамомашину постоянного тока и брать от нее эл. ток, мы пустим в обмотки этой машины ток от постороннего источника тока, то машина, на основании закона воздействия магнитного поля на находящиеся в нем проводники с током (закон Био-Савара), начнет вращаться и может производить некоторую механическую работу. Таким образом все электрические генераторы постоянного тока являются обратимыми машинами и будут работать двигателями при пропускании через них тока

от какого-нибудь источника тока. Конечно и обратно, — каждый электрический двигатель постоянного тока может начать работать генератором, если его возбудить и привести во вращение каким-нибудь двигателем.

Если у электрических генераторов нас интересовали прежде всего их электрические свойства: изменение напряжения, силы тока и пр., то у двигателей в первую очередь нас интересуют их механические свойства: вращающий момент, число оборотов, направление вращения и пр. Скажем все же сначала несколько слов об электрических свойствах электродвигателей.

Прежде всего необходимо отметить, что при вращении двигателя, в его якоре, на основании закона индукции, возбуждается некоторая эл.-дв. сила, величина которой определяется совершенно так же, как в электрических генераторах, т.-е. будет равна:

$$E_a = \frac{p}{a} N \cdot \Phi \cdot \frac{n}{60} \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \qquad (279)$$

Направление вращения двигателей определяем, зная направление тока в якоре и магнитного потока, по правилу трех пальцев левой руки. Что же касается индуктированной при вращении в якоре эл.-дв. силы, то ее так же, как в генераторе, определяем по правилу трех пальцев правой руки. Отсюда легко установить, что индуктированная в якоре электродвигателя эл.-дв. сила будет иметь направление, обратное току, текущему в якоре, а следовательно, обратное направление и по отношению к приложенному к зажимам якоря напряжению. Эта эл.-дв. сила поэтому и носит название „обратной" эл.-дв. силы двигателя.

Приложенное к зажимам двигателя (предполагаем шунтовой двигатель) напряжение (E_k) должно уравновесить обратную эл.-дв. силу (E_a) и омическое падение напряжения в обмотке якоря и в щетках, откуда:

$$E_k = E_a + I_a(R_a + R_u) \qquad (280)$$

Здесь R_u — сопротивление в щетках и переходном слое между щетками и коллектором [1]).

Отсюда:

$$I_a = \frac{E_k - E_a}{R_a + R_u} \qquad (281)$$

[1]) $I_a R_u = 2\Delta P$.

Обычно сопротивление якоря и щеток бывает очень мало (порядка десятых и сотых долей ома для машин небольшой и средней мощности), следовательно, и омическое падение напряжения $I_a(R_a + R_u)$ есть величина малая. Отсюда можно заключить, что приложенное напряжение E_k и обратная эл.-дв. сила E_a мало разнятся между собой.

В силу выражения (279) можно сказать, что в момент пуска в ход, когда число оборотов двигателя $n=0$, его обратная эл.-дв. сила E_a тоже равняется нулю и в этот момент сила тока будет определяться простым законом Ома, т.-е.

$$I_{пуск} = \frac{E_k}{R_a + R_u} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (282)$$

При малом сопротивлении якоря и щеток мы получили бы в якоре огромный ток, который сможет пережечь якорную обмотку. Чтобы этого не случилось, необходимо при пуске в ход двигателя в цепь якоря последовательно включить достаточно большое омическое сопротивление, которое смогло бы уменьшить пусковой ток в якоре до нормальных размеров. По мере того как двигатель станет разворачиваться, в нем появится обратная эл.-дв. сила и быстро уменьшит якорный ток до нормальных размеров. С этого момента подключенное к якорю пусковое сопротивление станет не только бесполезным, но даже вредным, так как будет уменьшать вращающий момент и число оборотов. Поэтому, по мере возрастания числа оборотов и приближения их к нормальному числу, в пусковом реостате постепенно выводят сопротивление. В силу этих же обстоятельств (опасности перегорания обмотки якоря) приходится очень осторожно относиться к цепи возбуждения и никоим образом не допускать ее обрыва или выключения. Разрыв цепи повел бы к уничтожению обратной эл.-дв. силы в выражении (281), что повело бы опять к перегреву обмотки якоря машины. Для скорейшего возрастания обратной эл.-дв. силы и уменьшения тока в якоре при пуске в ход двигателя необходимо давать ему наибольшее возбуждение.

На основании выражения (279) мы можем написать, что число оборотов двигателя равно:

$$n = \frac{60 \cdot a \cdot 10^8}{p \cdot N} \cdot \frac{E_a}{\Phi}, \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (283)$$

или, обозначая постоянную часть этого выражения через

$$c_1 = \frac{60 \cdot a \cdot 10^8}{p \cdot N} \qquad (284)$$

и имея в виду равенство (280), получим:

$$n = c_1 \cdot \frac{E_a}{\Phi} = c_1 \cdot \frac{E_k - I(R_a + R_u)}{\Phi} \qquad (285)$$

Так как в силу малости омических сопротивлений в этом выражении величина $I(R_a + R_u)$ мала, то главное влияние на число оборотов двигателя оказывают приложенное к зажимам якоря напряжение E_k и магнитный поток, создаваемый обмоткой или обмотками возбуждения, наложенными на магниты. Этими соотношениями и пользуются для регулирования числа оборотов, при чем или меняют ток в обмотке возбуждения, изменяя сопротивление в шунтовом реостате, или меняют (обычно понижают) напряжение на зажимах якоря, вставляя перед якорем регулировочное сопротивление, поглощающее часть напряжения, подводимого из сети. Чаще пользуются первым способом регулирования, особенно у шунтовых двигателей, как более дешевым (малый ток в цепи шунта — более тонкая проволока регулировочного реостата) и более удобным. В отдельных случаях приходится прибегать и ко второму способу регулирования числа оборотов.

Если нужно изменить направление вращения двигателя, то легко сообразить, исходя из правила Флеминга (трех пальцев левой руки) для двигателей, что для этого нужно или изменить направление тока в обмотке магнитов, не меняя направления тока в обмотке якоря, или, наоборот, не меняя тока в обмотке магнитов, изменить направление тока в обмотке якоря. При одновременном изменении направления тока как в обмотке магнитов, так и в обмотке якоря двигатель будет продолжать вращаться в прежнем направлении.

Что касается вращающего момента (M), то выражение для него найдем, исходя из закона Био-Савара.

Согласно этому закону [см. выражение (7)], поле с магнитной индукцией B_{cp} оказывает на находящийся в нем проводник длиной l *см* с протекающим по нему током в i ампер давление, величина которого равна:

$$P = \frac{l \cdot i \cdot B_{cp}}{9{,}81} \cdot 10^{-6} \text{ кг} \qquad (286)$$

Если мы будем иметь не один проводник, а N таких же проводников, то давление поля на пучок этих проводников будет в N раз больше. Предположив, что эти N проводников расположены по окружности якоря с диаметром D *см*, получим величину вращающего момента, действующего на якорь при средней индукции по окружности якоря $B_{ср}$, равной:

$$M = \frac{P \cdot D}{2 \cdot 100} = \frac{N \cdot i \cdot D \cdot l \cdot B_{ср}}{9{,}81 \cdot 2} \cdot 10^{-8} \text{ килограммометров.} \quad (287)$$

Имея в виду, что здесь $i = \frac{I_a}{2a}$, где I_a есть суммарный ток якоря, и, помножая числитель и знаменатель на π, можем написать:

$$M = \frac{N I_a \cdot \pi D \cdot l \cdot B_{ср}}{2a \cdot 2\pi \cdot 9{,}81} \cdot 10^{-8} \text{ кг-м}, \quad \ldots\ldots \quad (288)$$

или, так как $\pi D l B_{ср} = 2p\Phi$, где Φ есть магнитный поток, выходящий из одного полюса, получим:

$$M = \frac{N \cdot p \cdot 10^{-8} \cdot I_a \cdot \Phi}{2\pi \cdot a \cdot 9{,}81} = C_2 \cdot I_a \cdot \Phi \text{ кг-м} \quad \ldots \quad (289)$$

где

$$C_2 = \frac{N \cdot p \cdot 10^{-8}}{2\pi \cdot a \cdot 9{,}81} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (290)$$

есть некоторая постоянная для данной машины.

Как мы сказали выше, свойства двигателей характеризуются главным образом их числом оборотов и вращающим моментом при разных условиях работы.

Первая величина прямо пропорциональна индуктированной в двигателе обратной эл.-дв. силе и обратно пропорциональна магнитному потоку

$$n = c_1 \frac{E_a}{\Phi}.$$

При нагрузке двигатель начинает брать в якорь больше тока из сети I_a. В зависимости от этого более или менее сильно меняется эл.-дв. сила двигателя и его магнитный поток. Если эл.-дв. сила уменьшается скорее, чем магнитный поток, то число оборотов падает. Если уменьшение эл.-дв. силы идет одинаково

быстро с уменьшением магнитного потока, число оборотов остается постоянным.

При более медленном уменьшении эл.-дв. силы по сравнению с уменьшением магнитного потока число оборотов двигателя возрастает.

Что касается вращающего момента, то он возрастает пропорционально с возрастанием магнитного потока и тока в якоре.

$$M = C_2 \cdot I_a \cdot \Phi.$$

Если вращающий момент двигателя меньше, чем момент сопротивления, то число оборотов уменьшается.

Если, наоборот, момент вращения больше, чем нагрузочный момент на валу, то число оборотов двигателя возрастает до тех пор, пока оба момента не станут равными.

Но если при увеличивающемся числе оборотов вращающий момент двигателя будет все время оставаться больше момента сопротивления, то имеется опасность, что двигатель примет слишком большое число оборотов и якорь разорвется, как говорят, двигатель разнесет.

В этом случае двигатель в отношении числа оборотов является неустойчивым и не годится для практической работы. Если же вращающий момент с увеличением числа оборотов уменьшается, то работа двигателя является устойчивой, и он устанавливается на определенное число оборотов, соответствующее данной нагрузке.

В двигателях ампер-витки, создающие магнитный поток, получаются, с одной стороны, при помощи тока возбуждения $i_в$, протекающего по шунтовой обмотке магнитов, с другой стороны— при помощи главного тока якоря I_a, протекающего по последовательной обмотке возбуждения, намотанной на магнитах. В соответствии с бóльшим или меньшим влиянием, которое оказывает якорный ток I_a на создание главного магнитного потока, различают три типа электродвигателей:

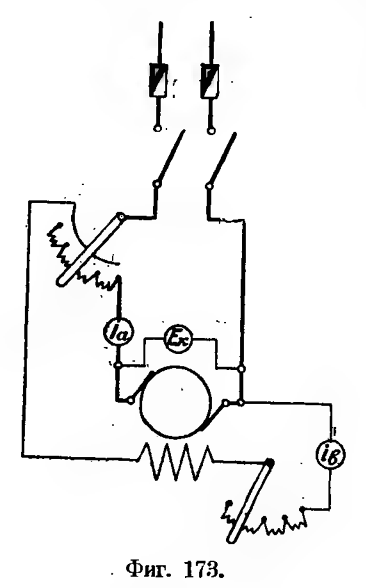
1. Шунтовой двигатель, в котором возбуждение создается исключительно шунтовой обмоткой. Главный ток якоря I_a оказывает влияние на магнитный поток только через реакцию якоря. При сдвиге щеток против направления вращения реакция якоря действует на главное поле ослабляющим образом.

Схема соединений двигателя показана на фиг. 173.

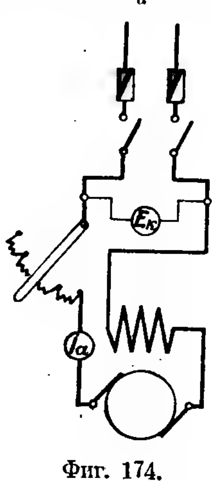
2. Последовательный двигатель (или сериес двигатель). Шунтовой обмотки возбуждения не имеется, и весь магнитный поток создается главным якорным током I_a.

Схема соединений такого двигателя показана на фиг. 174.

3. Двигатель со смешанным возбуждением (компаунд), в котором действие шунтовой обмотки возбуждения сочетается с действием последовательно (компаундной) обмотки, обтекаемой якорным током I_a.



Фиг. 173.



Фиг. 174.

Схема соединений компаундного двигателя показана на фиг. 175, при чем здесь так же, как у компаундных генераторов, различают двигатели с коротким шунтом (на фиг. 175 соединения показаны сплошными линиями) и двигатели с длинным шунтом (соединение показано пунктиром).

Все эти три типа двигателей можно мыслить полученными путем обращения генераторов: соответственно шунтового, последовательного и компаундного. В конструктивном отношении и в отношении внутренних соединений в машине эти двигатели совсем не будут отличаться от соответствующих генераторов.

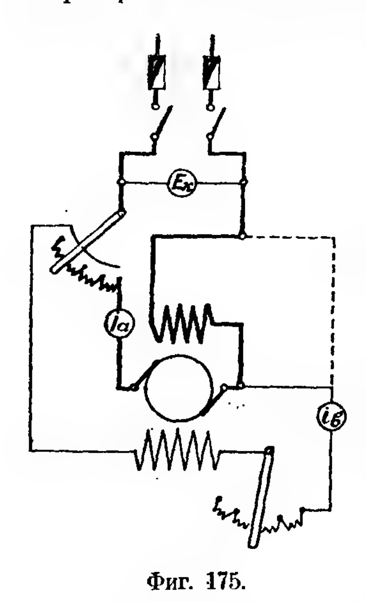
7. Шунтовой двигатель.

(См. схему фиг. 173.)

В силу параллельного приключения шунтовой обмотки возбуждения при постоянстве напряжения в сети ток в обмотке возбуждения остается постоянным (предполагаем $R_n = const$).

Таким образом магнитный поток в шунтовом двигателе мало меняется. Изменение потока происходит лишь под действием реакции якоря.

Так как вращающий момент двигателя пропорционален произведению тока в якоре на величину магнитного потока $[M = C_2 I_a \Phi]$, то при приблизительно постоянном потоке с увеличением нагрузки двигателя должен увеличиваться его ток (I_a). Увеличение тока в якоре, с одной стороны, увеличивает падение напряжения в двигателе, а, с другой стороны, увеличивает размагничивающее действие реакции якоря при постоянном положении щеток. Увеличение омического падения напряжения в двигателе, как видно из выражения для числа оборотов двигателя $n = C_1 \frac{E_k - I_a (R_a + R_u)}{\Phi}$,



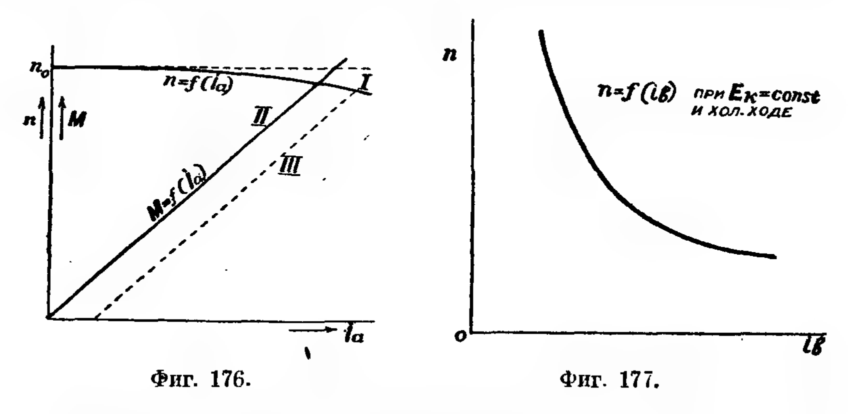
Фиг. 175.

при постоянном напряжении на зажимах якоря E_k, должно уменьшать число оборотов двигателя. Наоборот, увеличение размагничивающего действия реакции якоря уменьшает магнитный поток Φ и, следовательно, должно увеличивать число оборотов двигателя. Таким образом омическое падение напряжения и реакция якоря действуют обратно по отношению друг другу. Поэтому, в зависимости от преобладания того или другого, при увеличении нагрузки может быть или уменьшение или увеличение числа оборотов двигателя. Обычно в шунтовых двигателях встречается некоторое уменьшение числа оборотов с нагрузкой. Впрочем изменение числа оборотов нормально бывает весьма незначительное.

Кривая, представляющая изменение числа оборотов в зависимости от тока в якоре $[n = f(I_a)]$ при постоянном напряжении на зажимах и постоянном токе возбуждения ($E_k = const$, $i_в = const$), играющая у двигателей роль внешней характеристики, представится кривой I на фиг. 176. На той же фигуре нанесена (кривая II) *кривая вращающего момента двигателя*. Так как вращающий момент пропорционален произведению силы якорного тока на величину

магнитного потока, то при приблизительно постоянном значении магнитного потока вращающий момент в шунтовом двигателе должен изменяться пропорционально току, т.-е. кривая зависимости $M=f(I_a)$ должна пойти приблизительно прямолинейно. На фиг. 176 кривая II изображает полный вращающий момент, не учитывая потерь в двигателе. Кривая III на той же фигуре дает величину полезного вращающего момента, равного полному за вычетом момента сопротивления потерь в двигателе на трение и других.

Интересной для характеристики двигателя является **кривая, представляющая зависимость числа оборотов машины от тока возбуждения** $[n=f(i_в)]$ при холо-



Фиг. 176. Фиг. 177.

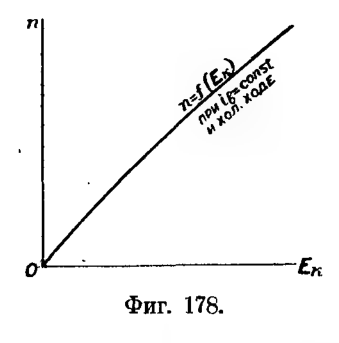
стом ходе и постоянном напряжении на зажимах якоря ($E_k=const$). Так как $n=C_1\frac{E_a}{\Phi}$, то, при постоянном напряжении E_k и мало меняющемся токе в якоре I_a (холостой ход), E_a остается приблизительно постоянной. Следовательно число оборотов n должно меняться обратно пропорционально потоку Φ. При малых насыщениях поток изменяется прямо пропорционально току возбуждения, и изменение числа оборотов в зависимости от изменения тока возбуждения пойдет почти прямолинейно. При достижении насыщения железа магнитный поток будет увеличиваться медленнее тока возбуждения, и кривая $n=f(i_в)$ будет загибаться. Общий вид кривой $n=f(i_в)$ показан на фиг. 177. При экспериментальном снятии этой кривой обычно начинают с наибольшего тока возбуждении и идут затем вниз.

Предельное увеличение числа оборотов, которое можно допустить выше нормального, всецело зависит от конструкции якоря

и коллектора. Некоторыми ориентировочными предельными нормами увеличения числа оборотов двигателей сверх нормального могут служить следующие, к которым, впрочем, все же надо подходить с осторожностью.

Мощность в kW	Максим. допустимое увеличение числа оборотов в % от нормального
до 1 kW.	80
„ 5	60
„ 25	50
„ 50	35
„ 100	30

Кривая, показывающая зависимость числа оборотов двигателя от напряжения на зажимах якоря [$n=f(E_k)$], при постоянном токе возбуждения ($i_в=const$) и холостом ходе, как видно из выражения (285) для числа оборотов, должна быть приблизительно прямолинейной (см. фиг. 178).



Фиг. 178.

Все основные характеристичные кривые шунтового двигателя приближенно можно построить путем теоретического расчета на основании одного опыта холостого хода и значения омических сопротивлений якоря (R_a+R_u) и обмотки возбуждения ($r_п$). Пусть нормальное число оборотов двигателя без нагрузки будет n_o при токе возбуждения $i_{в_1}$. Отмечаем при этом числе оборотов и этом возбуждении напряжение на зажимах якоря двигателя $E_{к_0}$ и силу тока в якоре I_o (при холостом ходе).

Имея эти данные, можно найти все интересующие нас величины для любого тока I_a в якоре.

Обратную эл.-дв. силу E_a, индуктированную в якоре, найдем по выражению:

$$E_a=E_k-I_a(R_a+R_u) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (291)$$

Вся энергия[1]), которая поступает в двигатель, распадается на две части: энергию, которая идет в якорь E_kI_a, и энергию,

[1]) Здесь и в дальнейшем мы подразумеваем энергию, развиваемую или поглощаемую машиной за единицу времени. Точнее вместо слова „энергия“ следовало бы сказать „мощность“.

которая идет в цепь обмотки возбуждения $E_k i_в$. Последняя энергия целиком тратится на нагревание цепи возбуждения. Действительно, потери на нагревание цепи возбуждения (обмотки возбуждения и шунтового реостата) равны:

$$i_в^2 r_п = i_в r_п \cdot i_в = E_k i_в \quad \ldots \ldots \quad (292)$$

Энергия же, которая поступает в якорь ($E_k \cdot I_a$), расходуется, с одной стороны, на нагревание обмотки якоря $[I_a^2(R_a + R_u)]$, а, с другой стороны, на создание механического вращающего момента. Энергия, превращающаяся в механическую и идущая на создание вращающего момента, будет:

$$E_k I_a - I_a^2(R_a + R_u) = E_a I_a \quad \ldots \ldots \quad (293)$$

Часть этой механической энергии тратится на преодоление других сопротивлений и потерь (механических сопротивлений трения, магнитных потерь), остальная часть превращается в полезную работу, совершаемую валом мотора. То, что из этой энергии идет на преодоление потерь, мы можем легко найти, зная энергию, которую забирает якорь двигателя при работе вхолостую ($E_{к_0} \cdot I_o$). Действительно, при работе вхолостую двигатель не совершает никакой полезной работы, и вся энергия, получаемая в это время двигателем из сети, идет на потери в двигателе.

В энергию $E_a I_a$, идущую на создание полного вращающего момента, кроме полезной энергии, идущей на создание полезного вращающего момента, входят лишь потери механические и магнитные. Энергия, расходуемая двигателем на эти потери при холостом ходе, равна (см. выше):

$$E_{к_0} I_0 - I_0^2(R_a + R_u) = E_0 I_0, \quad \ldots \ldots \quad (294)$$

где E_0 — обратная эл.-дв. сила двигателя при холостом ходе.

Считая приближенно, что эти потери одинаковы при холостом ходе и при нагрузке, если двигатель в обоих случаях работает при одном и том же токе возбуждения и одном и том же числе оборотов (что, как мы увидим позднее, довольно близко соответствует действительным условиям), найдем полезную энергию, расходуемую двигателем на валу в ваттах:

$$A_W = E_a I_a - E_o I_o, \quad \ldots \ldots \quad (295$$

или в лош. силах

$$A_{л. с.} = \frac{E_a I_a - E_o I_o}{736} \text{ л. с.} \qquad (296)$$

Так как число оборотов шунтового двигателя с нагрузкой несколько падает, приходится опыт холостого хода (определение $E_o I_o$) проделать для нескольких разных чисел оборотов. Для более приближенных определений иногда ограничиваются одним отсчетом для одного какого-нибудь среднего нормального числа оборотов двигателя, имея в виду, что число оборотов у шунтовых двигателей при постоянном токе возбуждения и постоянном напряжении мало меняется, а следовательно, мало меняются и зависящие от него механические и магнитные потери.

Число оборотов n двигателя при нагрузке для тока I_a в якоре, соответствующего этой нагрузке, определяется из соотношений:

$$\frac{n}{n_o} = \frac{E_a}{E_o}, \text{ или } n = \frac{E_a}{E_o} \cdot n_o, \qquad (297)$$

где E_o и E_a — обратные эл.-дв. силы двигателя при холостом ходе и нагрузке (см. выражение 291).

Коэффициент полезного действия двигателя определяем как отношение полезной энергии, вырабатываемой двигателем, к затрачиваемой на приведение его в действие:

$$\eta = \frac{A_w}{E_k I_a + E_k \cdot i_в} = \frac{E_a I_a - E_o I_o}{E_k I_a + E_k i_в} \qquad (298)$$

Полный вращающий момент двигателя определим из равенства мощностей:

$$M \cdot \frac{2\pi n}{60} = \frac{E_a \cdot I_a}{9{,}81} \qquad (299)$$

Отсюда:

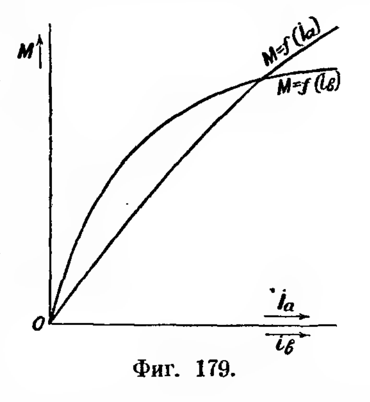
$$M = \frac{60}{2\pi n \cdot 9{,}81} E_a I_a \text{ кг-м} \qquad (300)$$

Наконец, полезный вращающий момент найдем из следующего выражения:

$$M_{полезн} = \frac{60}{2\pi n \cdot 9{,}81} \cdot (E_a I_a - E_o I_o) \text{ кг-м} \qquad (301)$$

Все определенные таким образом величины можно нанести в виде криных в зависимости от силы тока в якоре. Кривые будут иметь тот же вид, что и приведенные ранее.

При наличии тормазного приспособления (об устройстве тормазов будет сказано несколько слов далее) могут быть опытным путем легко определены и вращающий момент двигателя и развиваемая им полезная мощность. При помощи же тормаза не трудно определить и начальный (пусковой) вращающий момент двигателя в зависимости от силы тока в якоре I_a при постоянном возбуждении ($i_в = const$) или в зависимости от силы тока возбуждения $i_в$ при постоянном токе в якоре ($I_a = const$). Опыт ведется таким образом, что затормаживается шкив и подвешивается к плечу тормаза определенный груз P *кг* (устанавливается определенный момент сопротивления тормаза $M_{сопр} = P_{кг}\, l_{м}$). Затем в первом случае при постоянном токе возбуждения начинают увеличивать силу тока в якоре до тех пор, пока двигатель не возьмет с места. Этот опыт повторяют несколько раз, каждый раз меняя груз на тормазе и отмечая силу тока в якоре, когда двигатель начинает брать с места. Во втором случае поддерживают (реостатом) постоянный ток в якоре и меняют силу тока в шунте опять до того момента, пока двигатель не возьмет с места. Полученные таким образом кривые будут иметь вид, показанный на фигуре 179.



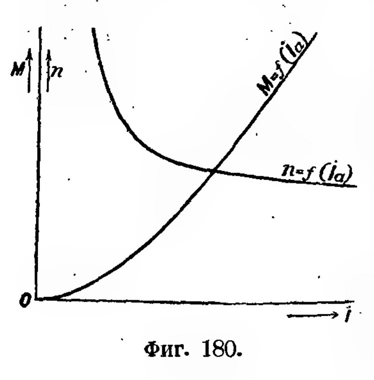
Фиг. 179.

8. Двигатель с последовательным возбуждением.

(См. схему фиг. 174.)

Так как в двигателе с последовательным возбуждением магнитный поток создается тем же током I_a, который протекает и по якорю, то в этом двигателе с увеличением нагрузки при постоянном напряжении возрастает ток I_a, а вместе с тем и магнитный поток Φ. В соответствии с этим уменьшается, согласно уравнению (285), и число оборотов двигателя. В силу значительных изменений тока возбуждения при нагрузке колебания числа оборотов у последовательных двигателей полу-

чаются значительно бо́льшими, чем у шунтовых двигателей. При уменьшении нагрузки соответственно уменьшается ток в якоре и последовательной обмотке I_a, а вместе с тем сильно возрастает число оборотов двигателя. При сбрасывании нагрузки полностью и постоянном напряжении на зажимах E_k увеличение числа оборотов может быть настолько большим, что двигатель разнесет. В силу этого двигатели с последовательным возбуждением никогда не пускаются без нагрузки, вхолостую. Форма кривой зависимости $n = f(I_a)$ при $E_k = const$ показана на фиг. 180.



Фиг. 180.

На той же фигуре нанесено изменение полного вращающего момента последовательного двигателя в зависимости от тока в якоре. Вращающий момент двигателя равен:

$$M = C_2 I_a \Phi.$$

В последовательном двигателе при малых насыщениях магнитный поток также изменяется пропорционально току I_a, протекающему по обмотке возбуждения, т.-е. в этом случае можно написать:

$$\Phi = K_1 \cdot I_a \quad \text{. . . . . (302)}$$

Отсюда:

$$M = C_2 \cdot K_1 \cdot I_a^2 = C_3 \cdot I_a^2, \quad \text{. . . . . (303)}$$

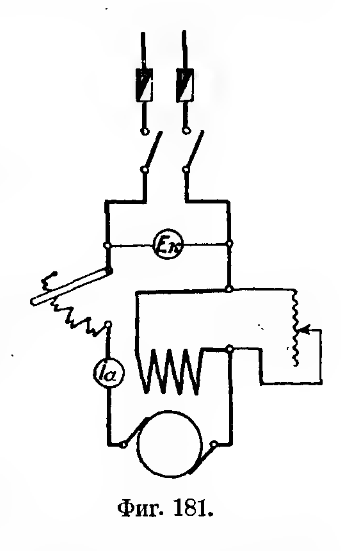
т.-е. при малых насыщениях вращающий момент у последовательного двигателя изменяется пропорционально квадрату силы тока в якоре.

При увеличении тока и увеличении, следовательно, насыщения железа двигателя возрастание его вращающего момента идет медленнее. Это обстоятельство, т.-е. более быстрый рост вращающего момента при меньшем увеличении силы тока в машине по сравнению с шунтовыми двигателями, делает последовательные двигатели особенно подходящими в тех случаях, когда требуется большой вращающий момент при пуске в ход и когда более резкие изменения числа оборотов двигателя при нагрузке особенного значения для работы двигателя не имеют (как например в трамвайных вагонах или в крановых установках и т. п.).

Хотя двигатели с последовательным возбуждением и употребляются преимущественно там, где особого постоянства числа оборотов при изменении нагрузки не требуется, все же при работе и этих двигателей иногда необходимо бывает регулировать число оборотов мотора, хотя бы и скачками через довольно большие промежутки. Так как ток возбуждения сериесных двигателей определяется всецело нагрузкой двигателя, то регулировать число оборотов его, влияя на ток в обмотке возбуждения, бывает затруднительно, особенно при необходимости понизить число оборотов машины. В этом случае для понижения числа оборотов применяют обычно добавочные реостаты, включенные так же, как и пусковой реостат (иногда усиливают для этой цели просто пусковой реостат) последовательно в цепь мотора перед якорем. Этот регулировочный последовательный реостат, вызывая вследствие своего омического сопротивления большее или меньшее падение напряжения в своих сопротивлениях, понижает тем самым напряжение, подводимое из сети к зажимам якоря двигателя, а следовательно, понижает и обороты.

Если в установке имеются два вместе работающих двигателя (например в трамвайном вагоне), то изменение скорости часто получают путем соединения обоих моторов, то последовательно друг с другом, то параллельно. Регулирование скорости путем последовательного включения дорого стоящих реостатов, рассчитанных на полную силу тока якоря и потребляющих много энергии, является мало экономичным.

Для повышения числа оборотов последовательных двигателей употребляют иногда параллельное включение некоторого сопротивления, шунтирующего несколько последовательную обмотку возбуждения двигателя и ослабляющего таким образом магнитное поле двигателя (см. схему фиг. 181).



Фиг. 181.

Изменяя сопротивление цепи этого шунта, можно регулировать степень ослабления поля и, следовательно, число оборотов двигателя.

9. Двигатель со смешанным возбуждением (компаунд).

Схема соединений показана на фиг. 175.

Двигатели с компаундной обмоткой применяются для двух целей: или для того, чтобы получить еще более постоянное число оборотов, чем у шунтового двигателя, или для того, чтобы, использовав преимущество большого вращающего момента при пуске в ход последовательного двигателя, предохранить его шунтовой обмоткой от разноса при малых нагрузках и холостом ходе. В первом случае основной обмоткой возбуждения является шунтовая, задачей же последовательной обмотки является только поддержание постоянным числа оборотов при нагрузке. При подсчете ампер-витков последовательной обмотки возбуждения необходимо подбирать их так, чтобы они уничтожали разность действий на число оборотов омического падения напряжения и реакции якоря (см. выше).

Если в двигателе преобладает действие омического падения напряжения, стремящегося понизить число оборотов двигателя, последовательная обмотка должна быть включена так, чтобы ток в ней протекал в обратном направлении по отношению к току в шунтовой обмотке, несколько размагничивая машину и тем вновь поднимая число оборотов двигателя до нормального. Такое включение компаундной обмотки называется иногда дифференциальным.

Если преобладает реакция якоря, ослабляющая главное поле, то компаундную обмотку включают согласно с главной (шунтовой) обмоткой возбуждения и таким образом компенсируют ослабляющее действие реакции якоря и поддерживают число оборотов постоянным. Так как и двигатель с шунтовым возбуждением очень мало меняет число оборотов при нагрузке, то обычно очень редко приходится прибегать к устройству компаундной обмотки с целью получения постоянного числа оборотов.

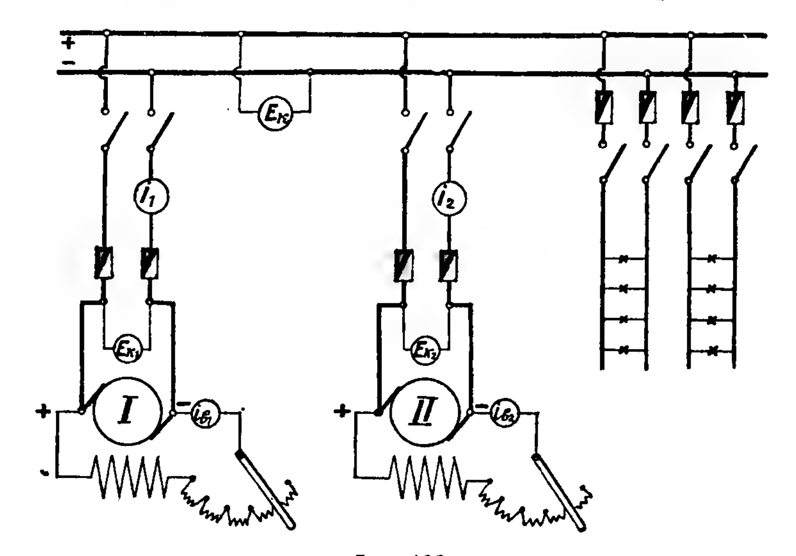
В случае, если компаундный двигатель берется вместо последовательного, последовательная обмотка является основной обмоткой возбуждения, шунтовая же служит лишь для предохранения от разноса двигателя при малых нагрузках.

В зависимости от того значения, которое имеют в компаундном двигателе шунтовая и последовательная обмотки возбуждения, мы имеем и по свойствам приближение или к шунтовым

или к последовательным двигателям. Соответственное приближение к тем или другим двигателям имеют и характеристичные кривые компаундных моторов.

10. Параллельная работа шунтовых генераторов.

Существенным вопросом в работе электрических машин является возможность заставить работать несколько машин совместно или, как говорят, параллельно на одну общую сеть. У машин постоянного тока, особенно шунтовых, параллельная работа на общую сеть совершается очень просто, при чем просто же происходит пуск в ход, приключение новых машин и обратное отключение части работающих машин; легко совершается и перевод нагрузки с одной машины на другую и правильное распределение нагрузки между параллельно работающими машинами.



Фиг. 182.

Рассмотрим, как происходит процесс пуска в ход, приключение к общей сети новой машины и перевод нагрузки с одной машины на другую. Предположим, что имеется всего две машины, схема соединения которых показана на фиг. 182. Пусть нормально работает и дает ток на шины и оттуда в сеть генератор I. Если мощность, потребляемая сетью, увеличится настолько, что первый генератор начнет перегружаться, необ-

ходимо пустить с ним параллельно генератор II. Для того чтобы при приключении второго генератора не было резкого толчка тока как в этом генераторе, так и в генераторе I, уже работающем на сеть, необходимо, чтобы в момент приключения нового генератора к шинам не было разности потенциалов между зажимами нового генератора и шинами. Для последнего требуется, чтобы правильно были подведены полярности зажимов, т.-е. чтобы провод от положительного полюса генератора был подведен к плюсовой шине распределительного устройства, равным образом соединение от отрицательного зажима генератора шло к отрицательной шине. Кроме того необходимо до включения рубильников между генератором и шинами возбудить приключаемый генератор так, чтобы его эл.-дв. сила E_{a_2} равнялась напряжению на шинах E_k при нормальном числе оборотов приключаемого генератора II. При таких условиях при включении рубильника, очевидно, не будет течения тока ни из генератора на шины ни с шин в генератор. Если мы теперь захотим перевести часть нагрузки с первого генератора на второй, только что приключенный, необходимо несколько увеличить возбуждение второго генератора, а следовательно, и его эл.-дв. силу E_{a_2}.

Теперь уже E_{a_2} будет больше E_k и начнется течение тока из якоря генератора II на шины, при чем сила тока, которая пойдет из генератора II на шины, определится, с одной стороны, разностью между эл.-дв. силой генератора и напряжением на шинах $(E_{a_2}-E_k)$, а, с другой стороны — сопротивлением якоря и щеток приключаемого генератора (R_a+R_u):

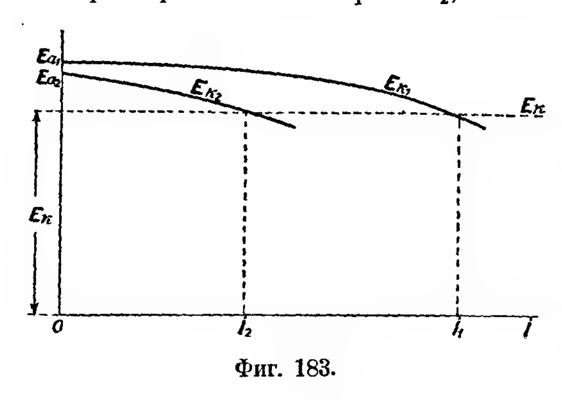
$$I_2=\frac{E_{a_2}-E_k}{R_a+R_u} \qquad (304)$$

Чем больше мы увеличим возбуждение и эл.-дв. силу второго генератора, тем бо́льшую нагрузку он возьмет на себя. При сохранении постоянной величины тока возбуждения первого генератора (I), первый генератор частично разгрузится и при этом несколько поднимет общее напряжение на шинах. Для сохранения постоянного напряжения на шинах при переводе нагрузки на второй генератор вместе с увеличением возбуждения у второго генератора необходимо одновременно понизить возбуждение у первого генератора.

Увеличивая ток возбуждения второго генератора и тем повышая его эл.-дв. силу, мы можем, наконец, всю нагрузку с первого генератора перевести на второй генератор. Это будет, очевидно, тогда, когда напряжение на шинах станет равным эл.-дв. силе первого генератора ($E_k = E_{a_1}$). В этот момент первый генератор будет работать вхолостую, без нагрузки. При дальнейшем повышении эл.-дв. силы второго генератора или понижении эл.-дв. силы первого эл.-дв. сила первого генератора сделается меньше напряжения на шинах ($E_{a_1} < E_k$), т.-е. начнется течение тока не от генератора на шины и в сеть, а, наоборот, с шин в генератор, и генератор начнет работать как двигатель. При этом возникает сразу же вопрос: при обратном течении тока, т.-е. с шин в наш генератор, и при переходе нашей машины от работы генератором к работе двигателем, не изменяется ли направление вращения нашей машины, работающей теперь двигателем, против направления вращения, которое она имела при работе генератором. Легко установить в данном случае, пользуясь правилом Флемминга, что и при переходе к работе двигателем наша шунтовая машина сохраняет направление вращения, какое она имела при работе генератором. При этом переходе от работы генератором к работе двигателем течение тока в шунтовой обмотке не меняет своего направления. Таким образом плавный переход от работы генератором к работе двигателем, совершаемый шунтовой машиной, является несколько менее опасным, чем был бы такой же переход у генератора с последовательным возбуждением, меняющего, как легко видеть, при таком переходе свое направление вращения на обратное.

Так как при любых режимах работы двух или нескольких генераторов напряжение на шинах должно быть одинаково для всех генераторов и, при большом сечении шин и соединительных проводов между шинами и генераторами, должно равняться довольно точно напряжению на зажимах генераторов, то распределение токов между отдельными генераторами легко определить, зная напряжение на шинах и внешние характеристики отдельных машин при взятых токах возбуждения. Так на фиг. 183 нанесены внешние характеристики (E_{k_1} и E_{k_2}) двух параллельно работающих генераторов. Возбуждения генераторов установлены так, что при холостом ходе первый развивает эл.-дв. силу E_{a_1} и второй E_{a_2}. Общее напряжение на шинах пусть устано-

вилось E_k. Тогда, очевидно, нагрузка каждого генератора определится пересечением горизонтали E_kE_k с каждой из внешних характеристик. Токи I_1 и I_2, соответствующие указанным точкам пересечения с внешними характеристиками, и определяют нагрузки первого (I_1) и второго (I_2) генераторов. Сумма токов I_1 и I_2 должна быть равной общей нагрузке сети. Так же легко графически определить перераспределение нагрузок между машинами при изменении общей величины нагрузки сети на шинах, при изменении возбуждения одной или другой машины и соответствующем подъеме или опускании кривой внешней характеристики того или другого генератора. Таким образом перевод и распределение нагрузок между параллельно работающими шунтовыми генераторами производится простым регулированием тока возбуждения в шунтовых обмотках генераторов при помощи шунтовых реостатов.

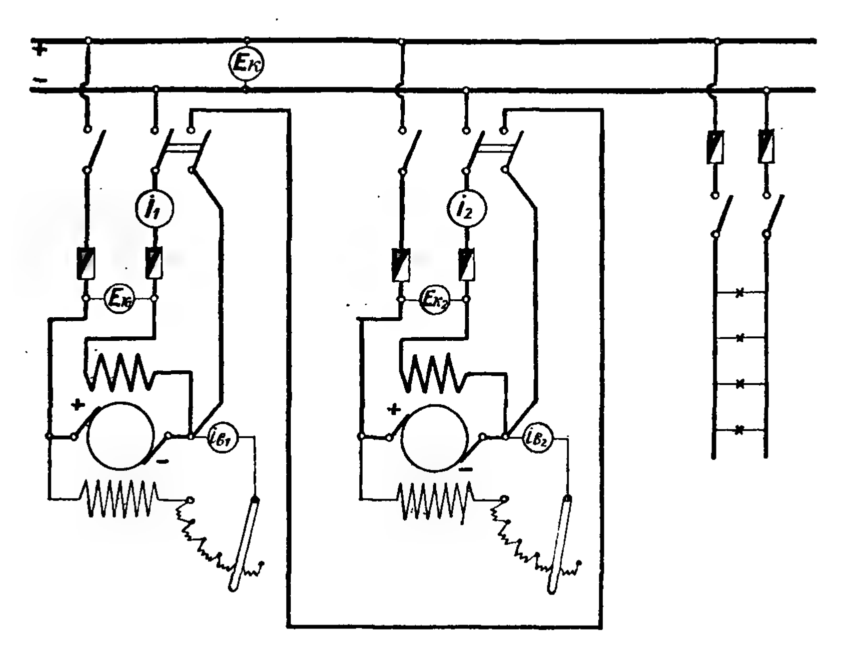


Фиг. 183.

11. Параллельная работа компаундных генераторов.

Несколько бо́льшую трудность представляет параллельная работа компаундных генераторов. Трудность заключается в том, что п и случайном понижении эл.-дв. силы одного из параллельно работающих генераторов здесь так же, как и при шунтовых машинах, ток через машину пойдет в обратном направлении (машина заработает двигателем), но, в то время как в шунтовой машине при переходе к работе генератором ток меняет свое направление только в якоре, в обмотке же возбуждения будет попрежнему итти в одном и том же направлении, у компаундной машины при постоянном направлении тока в шунтовой обмотке ток будет менять свое направление не только в якоре, но и в последовательной обмотке возбуждения, сильно размагничивая машину. В силу этих обстоятельств толчки тока и механические толчки в системе первичного механиче-

ского двигателя при параллельной работе компаундных генераторов возможны более значительные, чем при шунтовых машинах, если не принять некоторых специальных мер. Специальные меры в компаундных машинах и заключаются в таких устройствах, которые воспрепятствовали бы всякому изменению направления тока в компаундной обмотке машин при изменениях возбуждения и эл.-дв. силы в генераторах. Эти специальные предохранительные средства заключаются в устройстве



Фиг. 184.

так называемых уравнительных соединений между генераторами, при чем соединяются между собою одноименные полюса машин между якорем и компаундной обмоткой, как показано на фиг. 184. При включенном уравнительном соединении компаундные обмотки параллельно работающих генераторов оказываются включенными параллельно между двумя шинами, при чем токи (суммарный ток, вырабатываемый якорями всех параллельно работающих генераторов) в этих последовательных обмотках будут, на основании закона Кирхгофа, разветвляться обратно пропорционально сопротивлениям обмоток, при всех условиях сохраняя свое направление в последовательных обмотках неизменным.

Части машин, включенные между уравнительной шиной (проводом) и второй главной шиной (+ шиной в нашем примере фиг. 184), будут вести себя совершенно так же, как чисто шунтовые машины.

Для того чтобы при присоединении новой машины при включении уравнительного провода не получилось резкого колебания напряжения на шинах, обычно рубильник, присоединяющий уравнительный провод, включается одновременно с одним из главных полюсов, как показано на фиг. 184, при чем предварительно включается однополюсный рубильник, присоединяющий один из главных полюсов (+ на фиг. 184), и только затем уже по уравнении напряжения приключаемой машины с шинами включается двухполюсный рубильник, присоединяющий одновременно второй полюс машины и уравнительное соединение.

12. Определение сопротивлений якоря и обмоток возбуждения.

Сопротивление обмоток возбуждения шунтовой и последовательной определяется очень просто при помощи амперметра и вольтметра, отмечающих при пропускании тока через обмотку, с одной стороны, силу проходящего тока, а, с другой стороны, падение напряжения в обмотке. Тогда, по закону Ома, сопротивление обмотки равно:

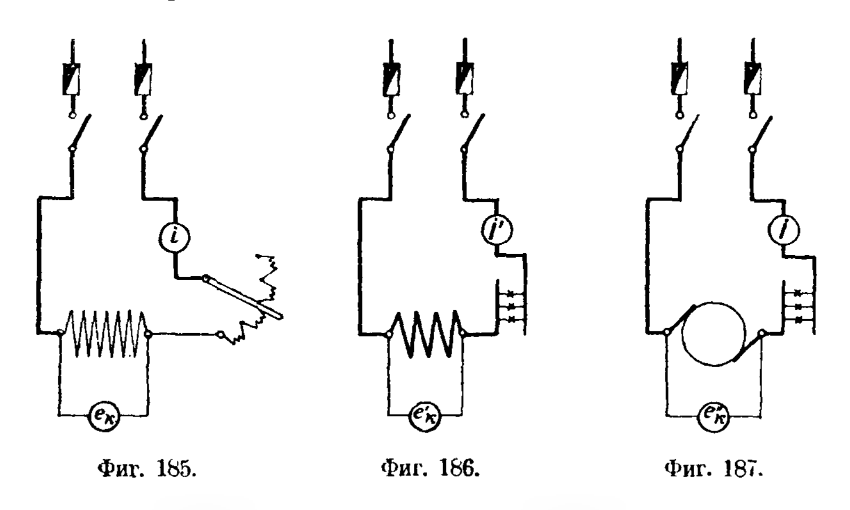
$$r_в = \frac{e_k}{i}, \quad \text{или} \quad R_h = \frac{e_k'}{I'} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (305)$$

Схема присоединения амперметра и вольтметра показана на фиг. 185 и 186. При подборе приборов и реостатов надо иметь в виду, что через шунтовую обмотку проходит малый ток (около 1—3% от нормального тока в якоре) и падение напряжения в этой обмотке немного менее напряжения на зажимах машины (E_k). Наоборот, в последовательной обмотке проходит ток, равный, или приблизительно равный, току в якоре (I_a), и падение напряжения в обмотке очень мало (несколько вольт) в соответствии с малым сопротивлением последовательной обмотки (обычно порядка десятых, сотых, а иногда и тысячных долей ома). Измерение сопротивления обмоток возбуждения можно производить и при нормальной схеме соединений (фиг. 154—157 и 173—175) с добавлением лишь вольтметра, при-

ключаемого к концам обмотоки, аналогично схемам 185 и 186. Машины могут в это время работать нормально с нагрузкой. Этим, как мы увидим далее, пользуются для определения повышения температуры обмоток по изменению их сопротивления.

В силу малой величины сопротивлений последовательной обмотки для ее более точного измерения вместо амперметра и вольтметра везде, где представляется возможность, пользуются мостиками, например двойным мостиком Томсона.

Что касается измерения сопротивления обмотки якоря, то обычно удовлетворяются измерением суммарного сопротивления обмотки якоря и контакта щеток.



Фиг. 185. Фиг. 186. Фиг. 187.

Схема соединений для измерения показана на фиг. 187. Вольтметр присоединяется к внешним якорным зажимам машины. Машина неподвижна, но, так как сопротивление контакта щеток неподвижной и вращающейся машины различное, рекомендуется при измерении медленно вращать машину от руки. Силу тока, пропускаемого по якорю, подбирают соответствующей нормальному току машины, беря также промежуточные отсчеты, соответствующие неполным нагрузкам машины. В качестве действительного сопротивления берут среднее из определений для разных сил тока. Сопротивление якоря получается всегда малое, порядка десятых, сотых и даже тысячных долей ома. Для более точных определений сопротивлений якоря также рекомендуется пользоваться мостиком (например Томсона).

Если желательно определить отдельно только сопротивление обмотки самого якоря (без сопротивления контакта щеток), то поступают следующим способом.

Все щетки накладывают на коллектор и пропускают ток через якорь так же, как и раньше при измерении сопротивления якоря вместе с сопротивлением щеток. К двум коллекторным пластинам, лежащим под щетками разной полярности, прикладывают при помощи медных проводов или специальных медных контактов провода от вольтметра или от мостика. Из показаний вольтметра и амперметра (или мостика) мы сейчас же можем определить действительное сопротивление якоря. Но такое измерение является мало точным, так как неравенство переходных сопротивлений под разными щетками легко может вызвать неравенство в распределении токов в якоре между отдельными параллельными цепями, а наш вольтметр в этом случае будет показывать падение напряжения лишь в одной параллельной цепи.

Дело будет обстоять несколько лучше, если при этом измерении мы угольные щетки заменим медными (с меньшим падением напряжения в переходном слое).

13. Определение числа витков шунтовой обмотки.

Иногда оказывается необходимым определить число витков шунтовой обмотки машины, не снимая ее и при отсутствии заводских данных о машине. В этом случае обычно поступают так, что на магниты поверх шунтовой обмотки навивают некоторое известное число витков W_1 тонкой проволоки. По новой добавочной обмотке пропускают переменный ток, подведя к зажимам ее напряжение, равное, e_{k_1}. Тогда шунтовая обмотка (отключается на это время от якоря машины) явится как бы вторичной обмоткой трансформатора и даст напряжение e_{k_2}, при чем из свойств трансформаторов известно, что эти два напряжения при холостой работе трансформатора относятся как числа витков той и другой обмотки.

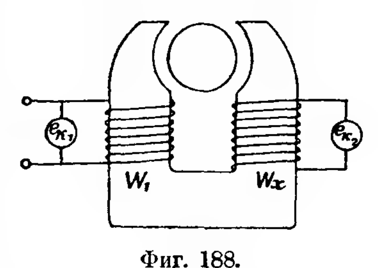
$$\frac{e_{k_1}}{e_{k_2}} = \frac{W_1}{W_x} \qquad (306)$$

Отсюда искомое число витков шунтовой обмотки W_x равно

$$W_x = W_1 \cdot \frac{e_{k_2}}{e_{k_1}} \qquad (307)$$

Схематически соединения добавочной и основной шунтовой обмоток показаны на фиг. 188.

При производстве опыта надлежит следить за тем, чтобы число витков добавочной обмотки было достаточно велико и чтобы напряжение, подводимое к зажимам первичной (добавочной) обмотки, было, наоборот, мало, иначе напряжение на зажимах вторичной обмотки может оказаться слишком большим, что в свою очередь может повести к пробою изоляции обмотки и повреждению измерительных приборов. В целях предосторожности правильнее за первичную обмотку взять шунтовую обмотку машины, а в качестве вторичной использовать добавочную обмотку с известным числом витков.



Фиг. 188.

Такое определение числа витков шунтовой обмотки является приближенным, так как обе обмотки магнитов — основная и добавочная — занимают по отношению к сердечнику магнитов разное положение, в силу чего потоки, пронизывающие обе обмотки, будут неодинаковы (вследствие рассеяния) неточным окажется и основное соотношение (306).

ГЛАВА СЕДЬМАЯ.

ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

1. Потери в электрических машинах постоянного тока.

При работе машины не вся энергия, затрачиваемая на приведение в действие машины, превращается в полезную работу; часть ее идет на покрытие потерь в машине, превращаясь в конечном счете в тепло. Потери, которые имеют место в машине, следующие:

1. Потери электрические, происходящие от прохождения тока по проводникам обмоток машины и вызывающие их нагревание.

Эти потери делятся на:

а) потери, идущие на нагревание обмотки якоря, включая сюда потери и в переходном слое между якорем и щетками;

б) потери, идущие на нагревание шунтовой обмотки возбуждения;

в) потери, идущие на нагревание последовательной обмотки возбуждения и обмотки дополнительных полюсов (если таковые имеются).

2. Железные или магнитные потери, называемые так потому, что происходят главным образом в железе якоря и отчасти магнитов вследствие магнитных причин.

Эти потери делятся на:

а) потери на гистерезис в железе якоря и в полюсных башмаках;

б) потери на токи Фуко в якоре и в полюсных башмаках.

3. Дополнительные потери, не поддающиеся такому точному учету, как перечисленные выше, и состоящие из добавочных потерь в железе якоря, являющихся следствием обработки якор-

ного корпуса, потери на токи Фуко в болтах, стягивающих листы якорного железа, потери на токи Фуко в меди якорной обмотки и в коллекторных пластинах, потери на уравнительные токи в якоре между отдельными параллельными цепями.

4. Механические потери, благодаря:

а) трению в подшипниках;

б) трению воздуха и

в) трению щеток.

2. Потери на нагревание в обмотке якоря и в переходном слое между щетками и коллектором.

а) Омические потери на нагревание обмотки якоря. Обозначим через l_a в *см* половину длины одного витка (при барабанном якоре). Тогда Nl_a представит собой полную длину всей якорной проволоки. Якорная обмотка имеет $2a$ параллельных цепей и в отношении сопротивления эквивалентна медному проводу длиной $\frac{N}{100} \cdot \frac{l_a}{2a}$ метров и сечением $2aq_a$ *мм*^{2}.

Отсюда сопротивление якорной обмотки равняется:

$$R_a = \frac{N}{100} \cdot \frac{l_a}{2a} \cdot \frac{\rho}{2a \cdot q_a} = \frac{N}{(2a)^2} \cdot \frac{l_a \rho}{100 \cdot q_a}, \quad \ldots \quad (308)$$

где ρ есть удельное сопротивление меди и может быть положено равным:

$$\rho = 0{,}0175\,(1 + 0{,}004 \cdot T_a) = \frac{1 + 0{,}004 \cdot T_a}{57} \text{ омов } \frac{мм^2}{м} \; . \quad (309)$$

Здесь T_a есть повышение температуры меди якоря над температурой воздуха (принимаемой около 15°C).

Таким образом

$$R_a = \frac{N}{(2a)^2} \cdot \frac{l_a \cdot (1 + 0{,}004\,T_a)}{5700\,q_a} \text{ омов} \quad \ldots \quad (310)$$

Потеря напряжения в обмотке якоря равна:

$$I_a R_a \text{ вольт} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (311)$$

и потеря энергии на нагревание якорной обмотки:

$$V_a' = I_a^2 R_a \text{ ватт} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (312)$$

При вычислении этих потерь распределение тока по отдельным параллельным цепям предполагается равномерным, что, как мы видели при рассмотрении обмоток, не всегда имеет место. Неравномерное распределение токов между параллельными цепями вызывает добавочные потери. Устройство эквипотенциальных соединений действует выравнивающим образом на токи и уменьшает добавочные потери. Эти добавочные потери обычно бывают относительно невелики и трудно поддаются математическому учету.

Для расчета сопротивления якоря необходимо знать длину половины витка l_a. Эту длину можно определить по следующим эмпирическим формулам.

Для двух полюсных машин:

$$l_a = l_1 + 1{,}25\,D + 5 \text{ см}, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (313)$$

для многополюсных машин:

$$l_a = l_1 + 1{,}4\,\tau + 5 \text{ см}, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (314)$$

где l_1 есть полная длина якоря, включая вентиляционные каналы, D — диаметр якоря, τ — полюсное деление.

б) Потери в переходном слое между щетками и коллектором. Если плотность тока под щетками постоянна, то эффективное [1]) падение напряжения в переходном слое равно среднему падению напряжения переходного контакта, которое мы обозначим через ΔP. Потери в переходном слое (на обоих полюсах машины) в этом случае равняются:

$$V_u' = 2\,I_a \Delta P \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (315)$$

Но, как только при коммутации появляются добавочные токи, коммутация становится непрямолинейной, равномерность распределения плотности под щеткой нарушается, и потенциальная кривая под щеткой будет проходить уже не горизонтально. При этом переходные потери увеличиваются сначала медленно, а затем, при больших добавочных токах, довольно быстро.

---

[1]) Под „эффективным“ падением напряжения мы подразумеваем величину падения напряжения, определяющую действительные потери в переходном слое, так что $V_{u\ \text{действ}} = 2\,I_a \Delta P_{\text{эфф}}$ ватт.

В этом случае потери в переходном слое можно принять равными:

$$V_u = 2\, I_a \Delta P \cdot f_u \text{ ватт}, \quad \dots\dots\dots \quad (316)$$

где f_u есть некоторый коэффициент, зависящий от формы потенциальной кривой под щеткой. Величину этого коэффициента при нормальной нагрузке и удовлетворительной коммутации можно принять равной:

$$f_u = \text{от } 1{,}1 \text{ до } 1{,}3 \quad \dots\dots\dots \quad (317)$$

При холостом ходе, но возбужденной машине, хотя сила тока в якоре $I_a = 0$, но в коротко замкнутых витках индуктируются добавочные токи, вызывающие некоторые потери в якоре и переходном слое, так что V_u в этом случае не равно нулю, хотя формула (316) в этом случае и принимает значение нуля. ΔP изменяется также не пропорционально току I_a, так что эти потери (V_u) собственно не совсем точно причислять к омическим потерям.

Все же в практических расчетах и испытаниях, как мы уже говорили выше, сопротивление переходного слоя (R_u) обычно причисляют к сопротивлению якоря (R_a) и потери на нагревание в обмотке якоря и в переходном слое вычисляют приближенно по формуле:

$$V_a = V_a' + V_u = I_a^2 (R_a + R_u). \quad \dots\dots \quad (318)$$

3. Потери на нагревание шунтовой обмотки.

При известном числе витков шунтовой обмотки W_n, средней длине каждого витка l_n *см* и сечении провода q_n *мм²* сопротивление шунтовой обмотки в омах равно:

$$r_n = \frac{W_n \cdot l_n (1 + 0{,}004 \cdot T_m)}{5700 \cdot q_n}, \quad \dots\dots \quad (319)$$

где T_m есть среднее повышение температуры меди шунтовой обмотки выше 15°C.

При силе тока в шунтовой обмотке i_e потеря на нагревание обмотки шунта будет равняться:

$$V_n' = i_e^2 r_n = \frac{(1 + 0{,}004 \cdot T_m) l_n \cdot s_n \cdot AW_t}{5700}, \quad \dots\dots \quad (320)$$

так как $\frac{i_e}{q_n} = s_n$ — плотности тока в обмотке и $W_n \cdot i_e = AW_t$.

Кроме сопротивления самой обмотки возбуждения почти всегда в цепь возбуждения бывает включен регулировочный реостат с сопротивлением r_p.

Таким образом сила тока в цепи шунта равняется:

$$i_в = \frac{E_k}{r_n + r_p} = \frac{E_k}{R_n}, \quad \ldots \ldots \quad (321)$$

где $R_n = r_n + r_p$.

Общие потери на нагревание всей цепи возбуждения равны:

$$V_n = i_в^2 (r_n + r_p) = i_в^2 \cdot R_n, \quad \ldots \ldots \quad (322)$$

из которых потери на нагревание собственно обмотки указаны в выражении (320), а на нагревание реостата и проводов идет часть, равная:

$$i_в^2 \cdot r_p = E_k \cdot i_в - V' \quad \ldots \ldots \quad (323)$$

4. Потери на нагревание последовательной обмотки возбуждения и обмотки дополнительных полюсов.

Обозначаем через W_h число витков последовательной обмотки возбуждения, через I_h — ток, текущий по последовательной обмотке. Пусть средняя длина одного витка этой обмотки равна l_h *см*, и сечение всех параллельно включенных витков равно q_h *мм²*.

Отсюда сопротивление последовательной обмотки будет равно:

$$R_h = \frac{W_h l_h (1 + 0{,}004 \cdot T_m)}{5\,700\, q_h} \text{ омов} \quad \ldots \ldots \quad (324)$$

и потери на нагревание этой обмотки:

$$V_h = I_h^2 \cdot R_h = \frac{(1 + 0{,}004 T_m) \cdot l_h \cdot s_h \cdot A W_t}{5\,700} \text{ ватт}, \quad \ldots \quad (325)$$

если имеется только одна последовательная обмотка возбуждения.

Если последовательная обмотка шунтирована шунтом, то потеря энергии в шунте равна:

$$I_h R_h (I_a - I_h) \quad \ldots \ldots \quad (326)$$

и общая потеря в последовательной обмотке и ее шунте равна:

$$V_{ht} = I_h^2 R_h + I_h R_h (I_a - I_h),$$

или

$$V_{ht} = I_a I_h R_h \text{ ватт} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (327)$$

Так как обмотка дополнительных полюсов и компенсационная обмотка большею частью обтекаются полным якорным током, то омические потери в этих обмотках определятся следующим выражением:

$$V_{wt} = I_a^2 R_w = \frac{(1 + 0{,}004 \cdot T_w) \cdot l_w s_w A W_w}{5700} \text{ ватт.} \quad \ldots \quad (328)$$

5. Потери на гистерезис.

Железо якоря при вращении машины проходит то под северным то под южным полюсом главных магнитов, при чем само намагничивается, меняя свою полярность в зависимости от своего положения в поле. На перемагничивание железа при вращении якоря тратится энергия.

Штейнметц нашел на основании своих опытов, что потеря энергии составляет на один цикл перемагничивания (один период) и один *см*³ объема железа приблизительно

$$\eta \cdot B_{max}^{1.6} \text{ эргов [1]}, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (329)$$

где η есть некоторая постоянная, зависящая от сорта железа, а B_{max} — максимальная индукция.

Отсюда потери на гистерезис на 1 *дм*³ объема железа при частоте перемагничивания c периодов в секунду в ваттах получатся:

$$V_h = (631 \cdot \eta) \left(\frac{c}{100}\right) \left(\frac{B_{max}}{1\,000}\right)^{1{,}6}, \quad \ldots \ldots \quad (330)$$

или, полагая $631 \cdot \eta = \sigma_{1h}$, получим:

$$V_h = \sigma_{1h} \left(\frac{c}{100}\right) \left(\frac{B_{max}}{1.000}\right)^{1{,}6} \text{ ватт/дм}^3 \quad \ldots \ldots \quad (331)$$

---

[1] 1 эрг $= 1 \cdot 10^{-7}$ ватт-секунд.

Эта формула, как показывают позднейшие исследования, является точной лишь для малых индукций: для больших же индукций проф. Richter нашел, что более точные результаты дает расчет потерь на гистерезис по формуле:

$$V_h = a \cdot B_{max} + b \cdot B^2_{max}, \quad \ldots \ldots \quad (332)$$

при чем для больших индукций можно первым членом этого выражения по сравнению со вторым пренебречь и с достаточной точностью считать

$$V_h = \sigma_{2h} \left(\frac{c}{100}\right)\left(\frac{B_{max}}{1000}\right)^2 \text{ватт}/\text{дм}^3, \quad \ldots \ldots \quad (333)$$

где σ_{2h} есть величина, отличная от σ_{1h}.

Опыты, проделанные с некоторыми сортами железа, показывают, что для магнитных индукций ниже 10 000 магн. линий более точные результаты дает формула Штейнметца (331), для магнитных же индукций свыше 10 000 магн. линий правильнее считать по формуле Рихтера (333). Постоянная в формуле (333) Рихтера определяется из соотношения:

$$\sigma_{2h} = 0{,}398 \cdot \sigma_{1h} = 0{,}398 \cdot 631 \cdot \eta = 251 \cdot \eta. \quad \ldots \ldots \quad (334)$$

Постоянная η обычно меняется для различных сортов железа от 0,0012 до 0,0016.

Что касается зубчатых якорей, то здесь потери на гистерезис в сердечнике якоря и в зубцах приходится рассчитывать отдельно.

а) Для расчета потерь на гистерезис в сердечнике якоря пользуются формулой (333), при чем частота перемагничивания определяется по соотношению:

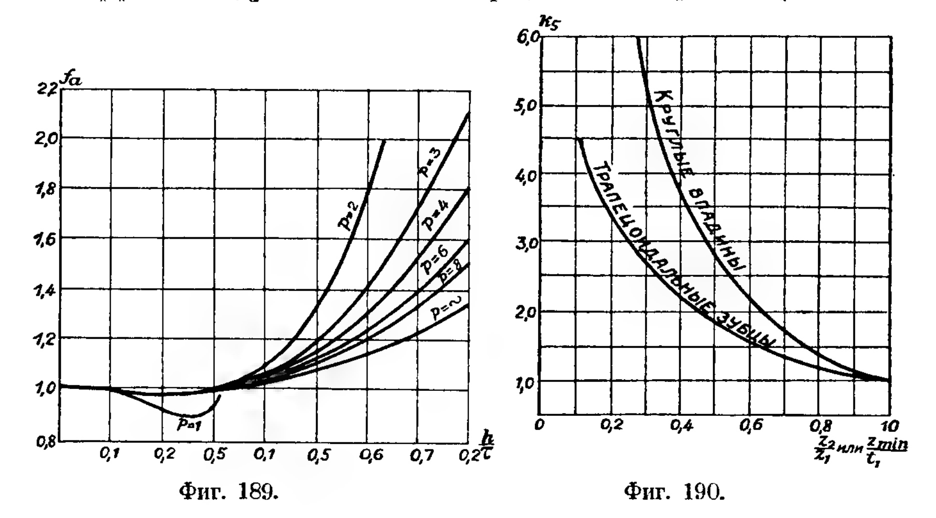
$$c = \frac{pn}{60} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (335)$$

Магнитная индукция B_{max} берется равной средней максимальной индукции в середчнике якоря B_a, и объем железа берется равный объему железа сердечника якоря V_a $дм^3$. Кроме того, так как магнитный поток и индукция распределяются неравномерно по сечению сердечника якоря, то потери на гистерезис получаются обычно несколько бо́льшими, чем получились бы по

формуле 333 при равномерном распределении магнитной индукции. В силу этого выражение 333 приходится множить еще на некоторый коэффициент f_a, учитывающий характер распределения индукции. Таким образом для расчета потерь на гистерезис в железе сердечника якоря мы получаем выражение:

$$V_{ha} = \sigma_{2h} f_a \left(\frac{c}{100}\right) \left(\frac{B_a}{1\,000}\right)^2 \cdot V_a \text{ ватт}; \quad . \; . \; . \; . \quad (336)$$

коэффициент f_a может быть определен по кривым фиг. 189



Фиг. 189.

Фиг. 190.

в зависимости от отношения $\frac{h}{\tau}$ при разных числах пар полюсов p. Здесь h есть радиальная высота железа сердечника якоря в *см*, а τ — полюсное деление по окружности, проходящей по основаниям впадин.

б) Для расчета потерь на гистерезис в зубцах якоря может быть также использована основная формула (333). В силу того, что в зубцах в зависимости от того сечения зубца, которое мы берем, меняется магнитная индукция, необходимо, взяв в качестве основной магнитной индукции величину индукции B_{zmin}, ввести поправочный коэффициент k_5, определяемый по кривым фиг. 190. На этой фигуре одна кривая дана для зубцов трапецоидальной формы в зависимости от соотношения минимальной (z_2) и максимальной (z_1) ширины зубца $\frac{z_{2min}}{z_{1max}}$. Дру-

гая кривая дана для круглых впадин в зависимости от соотношения минимальной ширины зубца и деления впадины $\frac{z_{min}}{t_1}$.

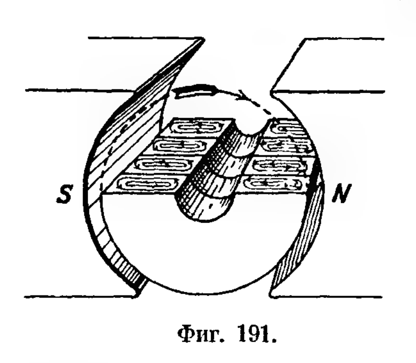
Таким образом потери на гистерезис в зубцах якоря с объемом железа зубцов V_z могут быть определены по формуле:

$$V_{hz} = \sigma_{2h} \cdot k_5 \left(\frac{c}{100}\right) \left(\frac{B_{zmin}}{1000}\right)^2 V_z \text{ ватт} \quad . \; . \; . \; . \; (337)$$

в) Кроме потерь на перемагничивание железа якоря потери на гистерезис имеются еще в полюсных башмаках, так как, как мы увидим далее, вследствие наличия на якоре зубцов магнитное поле под полюсами не является строго постоянным, а меняется $\left(\text{с частотой зубцов } c_{\eta} = \frac{Zn}{60}\right)$ между некоторыми максимальными и минимальными значениями. Переменное магнитное поле вызывает некоторое перемагничивание железа полюсных башмаков. Величина потерь энергии на это перемагничивание определена в следующем параграфе (см. пункт г).

6. Потери на токи Фуко.

При вращении якоря в магнитном поле и его перемагничивании в якорном железе индуктируются эл.-дв. силы, которые вызывают токи, замыкающиеся внутри самого железа, как это показано на фиг. 191. Эти токи имеют такое направление, что противодействуют изменению магнитной индукции в железе. Они (токи Фуко) вызывают нагревание железа якоря и требуют на свое поддержание некоторого расхода энергии. Для уменьшения токов Фуко и вместе с тем уменьшения потерь машины и нагревания железа якоря последний делают не из одного куска железа, а составным из пластин листового железа, изолированных друг от друга прослойкой из папиросной бумаги и насаженных на вал или крестовину якоря. Таким образом пластинчатая форма железа якоря увеличивает сопротивление железа в том направлении, в котором индукти-



Фиг. 191.

руются токи Фуко, и тем уменьшает их. Обычно бывает достаточно для якоря брать листы толщиной в 0,5 *мм*. При больших же частотах иногда толщину листов уменьшают до 0,3 *мм*.

Потери на токи Фуко, как известно, определяются при равномерном переменном поле выражением:

$$V_w = \sigma_w \left(\Delta \cdot \frac{c}{100} \cdot \frac{B_{max}}{1000} \right)^2 \text{ватт}/\text{дм}^3, \quad . \; . \; . \; . \; (338)$$

где Δ есть толщина железных листов в *мм*, а

$$\sigma_w = \frac{\pi^2}{6} \cdot \frac{1}{10^5 \cdot \rho} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (339)$$

есть некоторая постоянная, зависящая от электрической проводимости железа $\frac{1}{\rho}$.

Значения коэффициентов σ_{1h} и σ_{2h} для вычисления потерь на гистерезис и коэффициента σ_w для потерь на токи Фуко приведены для некоторых сортов железа в таблице 5, где также даны для этих сортов величины потерь в ваттах на 1 *кг* и 1 *дм*^{3} при $B_{max} = 10\,000$ и 50 периодах.

ТАБЛИЦА 5.

МАТЕРИАЛ.	Толщина железа Δ *мм.*	Потери при $B_{max}=10000$, $c=50$ пер.		σ_{2h}	$\sigma_w = \frac{\pi^2}{6} \cdot \frac{1}{10^5\rho}$	$10^4\rho$ омов $\frac{см^2}{см}$	σ_{1h}
		$\frac{ватт}{кг}$	$\frac{ватт}{дм^3}$				
Обыкнов. динамн. жел.	0,5	3,35	26,0	0,334	1,49	0,110	0,84
» » »	0,5	3,10	24,1	0,342	1,12	0,146	0,86
Обыкнов. динамн. жел.	0,35	2,85	22,2	0,311	2,16	0,076	0,782
» » »	0,35	2,70	21,0	0,296	2,03	0,081	0,745
» » »	0,35	2,77	21,5	0,314	1,90	0,086	0.790
» » »	0,35	2,70	21,0	0,311	1,78	0,092	0,782
Легированное железо .	0,5	1,65	12,8	0,218	0,311	0,528	0 549
» » .	0,5	1,87	14,5	0,236	0,435	0,377	0,594
Легир. жел. высш. кач.	0,5	1,50	11,6	0,187	0,373	0,440	0,470
» » » »	0,5	1,43	11,1	0,179	0,373	0,440	0,450
Электролитическое жел.	0,25	1,66	13,1	0,154	3,43	0,0478	0,388

Обычное ходовое якорное железо в Германии имеет гарантированную величину потерь на 1 *кг* в 3,6 ватт. Коэффициент гистерезиса этого железа равен $\sigma_{2h} = 0{,}36$, а коэффициент токов Фуко $\sigma_w = 1{,}6$.

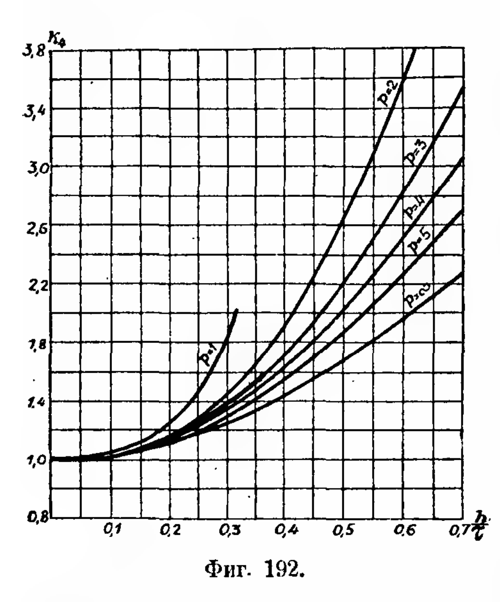
а) Потери на токи Фуко в якорном сердечнике. В силу разной индукции в сердечнике якоря и в зубцах потери на токи Фуко для этих частей якоря так же, как и потери на гистерезис, приходится рассчитывать отдельно.

Вследствие неравномерности распределения магнитного поля потери на токи Фуко для сердечника якоря получаются несколько бо́льшими, чем по формуле 338, и для учета увеличения их приходится в выражение для них внести некоторый коэффициент k_4 и вычислять потери на токи Фуко в сердечнике якоря по формуле:

$$V_{wa} = \sigma_w \cdot k_4 \left(\Delta \frac{c}{100} \cdot \frac{B_a}{1000}\right)^2 \cdot V_a \text{ ватт}, \quad . \ . \ . \ (340)$$

где V_a есть объем железа сердечника якоря.

Коэффициент k_4 на основании работ Rüdenberg'а и Ytterberg'а можно брать по кривым фиг. 192; формула (340) предполагает синусоидальную форму распределения магнитной индукции. Так как потери на токи Фуко растут пропорционально квадрату частоты, то при сильном отклонении формы поля от синусоидальной приходится считаться с влиянием высших гармонических поля на увеличение этих потерь.



Фиг. 192.

Величину потерь по формуле (340) надо в этом случае помножить на некоторый коэффициент f_4. Если мы действительную кривую магнитного поля с максимальной индукцией B_l разложим на ее гармонические с максимальными индукциями B_{l_1}, B_{l_3}, B_{l_5}, B_{l_7} и т. д. и найдем

максимальную индукцию $B_{l\sin}$ синусоидальной кривой, равновеликой по площади действительной кривой индукции, то коэффициент f_4 определится как отношение:

$$f_4 = \frac{B_{l1}^2 + 3B_{l3}^2 + 5B_{l5}^2 + \ldots}{B_l{}^2{}_{\sin}} \quad \ldots . (341)$$

Отсюда полное выражение для потерь на токи Фуко в сердечнике железа якоря представится в виде:

$$V_{wa} = \sigma_w \cdot k_4 \cdot f_4 \left(\Delta \frac{c}{100} \frac{B_a}{1000}\right)^2 \cdot V_a \text{ ватт} \quad \ldots . (342)$$

б) Потери на токи Фуко в зубцах. Так как потери на токи Фуко в переменном магнитом поле растут так же, как мы приняли для потерь на гистерезис, пропорционально квадрату магнитной индукции, то мы можем для потерь на токи Фуко в зубцах якоря при трапецоидальной форме зубцов взять тот же поправочный коэффициент k_5, что и при вычислении потерь на гистерезис в зубцах.

Для потерь на токи Фуко в зубцах получается тогда выражение:

$$V_{wz} = \sigma_w k_5 \left(\Delta \frac{c}{100} \cdot \frac{B_{z min}}{1000}\right)^2 \cdot V_z \text{ ватт}, \quad \ldots . (343)$$

где коэффициент k_5 берется по кривым фиг. 190.

При отклонении формы магнитного поля от синусоидальной и здесь приходится ввести при вычислении новый коэффициент f_5, учитывающий влияние на потери от токов Фуко в зубцах высших гармонических поля.

$$f_5 = \frac{B_{l1}^2 + 3^2 B_{l3}^2 + 5^2 B_{l5}^2 + 7^2 B_{l7}^2 + \ldots}{B^2{}_{l\sin}} \quad \ldots (344)$$

Если разложить на гармонические кривые поля I для холостого хода и III для нагрузки, приведенные на фиг. 117б, и нормальные в машинах постоянного тока, то получатся следующие данные максимальных индукций и коэффициентов f_4 и f_5.

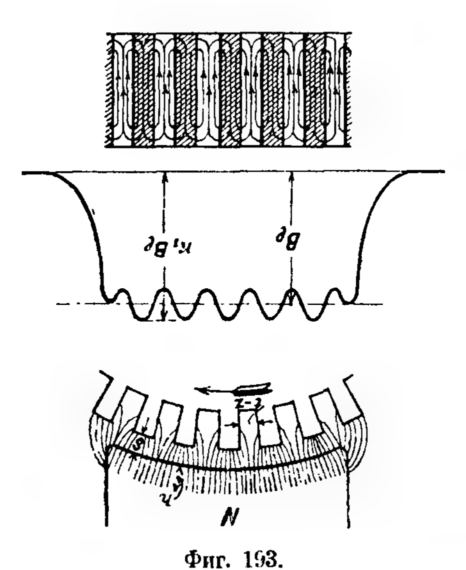
ТАБЛИЦА 6.

	B_l	B_{l1}	B_{l3}	B_{l5}	B_{l7}	$B_{l\min}$	f_1	f_3
Кривая I, хол. ход	93,3	103,2	2,8	13,4	6,8	100	1,19	2,02
Кривая III, нагруз.	111,2	105	8,2	14,1	8,2	100	1,27	1,60

При учете влияния высших гармонических поля общее выражение для потерь на токи Фуко в зубцах якоря получается равным:

$$V_{w_2} = \sigma_w \cdot k_5 \cdot f_5 \cdot \left(\Delta \frac{c}{100} \cdot \frac{B_{z\min}}{1000}\right)^2 V_z \text{ ватт. . . . . } (345)$$

в) Потери на токи Фуко в полюсных башмаках. Вследствие наличия зубцов на якоре магнитное поле вдоль полюсных башмаков распределяется неравномерно, и, магнитная индукция в междужелезном пространстве соответственно зубцам и впадинам имеет максимальные и минимальные значения, следующие одни за другими (см. фиг. 193). Если через B_l обозначить среднюю магнитную индукцию, то максимальная индукция в междужелезном пространстве может быть принята равной $k_1 B_l$. Таким образом мы видим (фиг. 193), что под полюсами на среднее значение магнитной индукции B_l накладывается волнообразная кривая, амплитуда которой равняется:



Фиг. 193.

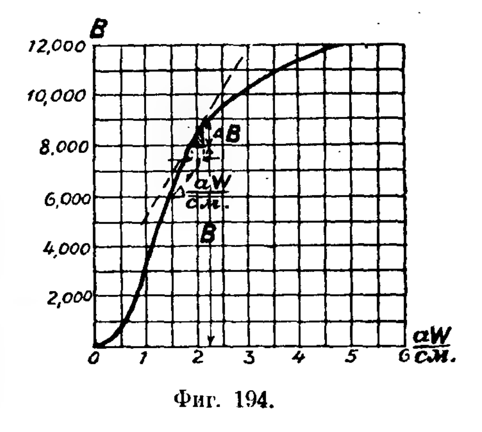
$$B_n = (k_1 - 1) B_l. \quad \ldots \ldots \ldots \quad (346)$$

При вращении якоря максимальные и минимальные значения кривой фиг. 193 сдвигаются относительно полюсных башмаков, благодаря чему получаются потери в железе полюсных башмаков.

Для массивных полюсных башмаков, согласно Рюденбергу, потери на токи Фуко (в одном полюсном башмаке) равняются:

$$V_{w} = \frac{1}{80\pi}\left(\frac{B_n}{1000}\right)^2 \left(\frac{v}{10}\right)^{1,5} \sqrt{\frac{t_1}{\rho\mu}} \cdot b \cdot l \text{ ватт} \quad . \; . \; (347)$$

Здесь v — обозначает окружную скорость якоря в метрах в секунду, t_1 — деление впадины в *см*, b — длину полюсной дуги в *см*, l — длину полюса в *см*, ρ — удельное сопротивление в омах $\frac{см^2}{см}$ и μ — среднюю магнитную проводимость железа.



Фиг. 194.

Так как амплитуда B_n колебаний поля по сравнению с средней индукцией в воздухе B_l относительно невелика, то, согласно Dreyfus'у, магнитная проницаемость железа μ может быть определена как отношение изменения индукции к изменению магнитной силы, т.-е., согласно фиг. 194:

$$\mu = \frac{\Delta B}{\Delta H} = \frac{1}{0,4 \cdot \pi} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta aW} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (348)$$

Значение удельного эл. сопротивления можно взять

$$\rho \text{ для чугуна} \backsim 1 \cdot 10^{-4} \text{ ома } \frac{см^2}{см};$$

$$\rho \text{ для стального литья} \backsim 2 \cdot 10^{-5} \text{ ома } \frac{см^2}{см};$$

значение коэффициента k_1 может быть взято по формулам (144 и 145).

Одновременно с потерями на токи Фуко в полюсных башмаках, благодаря колебаниям зубчатого поля, будут потери на гистерезис (перемагничивание).

При массивных полюсных башмаках потери в них на гистерезис, по сравнению с относительно большими потерями на токи Фуко, будут незначительны, и ими можно пренебречь.

Если полюсные башмаки для уменьшения потерь в них делаются из листового железа, то потери в них на токи Фуко можно вычислять по формуле:

$$V_{w\rho}=\sigma_w\left(\Delta\frac{c_n}{100}\cdot\frac{B_n}{1\,000}\right)^2\cdot k_4\cdot f_\rho V_\rho \text{ ватт}, \quad \ldots (349)$$

где поправочный коэффициент k_4 берется по кривым фиг. 192 для $p=\infty$.

Для случая, когда глубина h, на которую башмаки взяты пластинчатыми, взята равной $\frac{t_1}{2}$, потери на токи Фуко в пластинчатых башмаках могут быть вычислены по формуле [1]):

$$V_{w\rho}=\frac{\pi}{120\cdot t_1}\left(\Delta\frac{v}{10}\cdot\frac{B_n}{1000}\right)^2\cdot f_\rho bl \text{ ватт}. \quad \ldots (350)$$

Коэффициент f_ρ в формулах (349) и (350) определяет уменьшение потерь на токи Фуко вследствие обратного воздействия токов Фуко па магнитный поток, их вызвавший.

Значéние этого коэффициента находим по кривой фиг. 195, при чем значение ξ находим из равенства:

$$\xi=\lambda\frac{\Delta}{10}, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (351)$$

где Δ — толщина железного листа в *мм*, а

$$\lambda=\frac{2\pi}{10^4}\sqrt{\frac{c\cdot\mu}{10\cdot\rho}}; \quad \ldots\ldots\ldots (352)$$

μ здесь определяется из соотношения (348).

Удельное эл. сопротивление берется в омах.

2) Потери на гистерезис в полюсных башмаках при пластинчатой конструкции последних. В случае пластинчатых полюсных башмаков уже не приходится пренебрегать величиной потерь в них на гистерезис по сравнению с потерями на токи Фуко.

---

[1]) См. Arnold, Die Gleichstrommaschine, Bd. I. S. 579.

Эти потери на гистерезис, аналогично потерям на токи Фуко могут быть определены согласно выражениям:

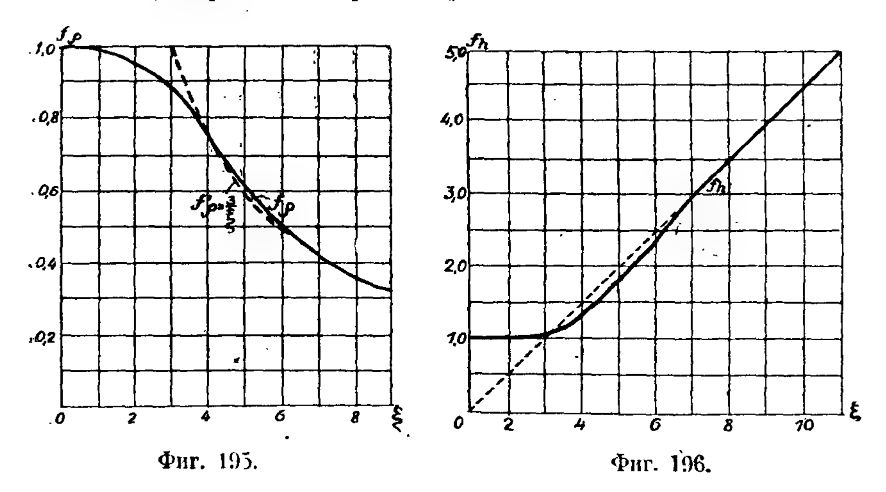
$$V'_{h\rho} = \sigma_{2h}\left(\frac{c_v}{100}\right)\left(\frac{B_n}{1000}\right)^2 f_a f_h V_\rho \text{ ватт} \quad . \; . \; . \quad (353)$$

или

$$V'_{h\rho} = \frac{\sigma_{2h}}{124\cdot\pi^2}\left(\frac{v}{10}\right)\left(\frac{B_n}{1000}\right)^2 f_h\cdot b\cdot l \text{ ватт}, \quad . \; . \; . \quad (354)$$

если положить $f_a = 1{,}61$ при $h = \frac{t_1}{2}$.

Коэффициент f_h, учитывающий увеличение потерь на гистерезис вследствие обратного воздействия токов Фуко на магнитные поля, берется по кривой фиг. 196.



Фиг. 195.

Фиг. 196.

Величина ξ при этом берется та же, что и при подсчете потерь на токи Фуко (выр-ие 351).

Формулы (353) и (354) предполагают изменение магнитной индукции между некоторым положительным и равным ему отрицательным значениями магнитной индукции, между тем здесь мы изменение индукции имеем лишь между двумя разными значениями одного знака.

Работы инженеров Holm и Ball показали, что при обычных колебаниях индукции в полюсных башмаках с амплитудой B_n = около 1000 и средней индукции в воздухе $B_l \cong$ от 5000 до 11000 действительные потери на гистерезис получаются большими, чем при симметричном перемагничивании (больше,

16*

в среднем по формуле 353 и 354) в 1,24—2,14 раза, т. е. в среднем в 1,7 раза.

Учитывая это, мы получим окончательную форму для расчета потерь на гистерезис в одном полюсном башмаке:

$$V_{hp} = \frac{\sigma_{2h}}{720}\left(\frac{v}{10}\right)\left(\frac{B_n}{1000}\right)^2 \cdot f_h b \cdot l \text{ ватт} \quad . \; . \; . \; . \; (355)$$

7. Добавочные потери в железе и меди якоря.

Кроме описанных выше потерь на токи Фуко, при некоторых обстоятельствах возникает еще ряд добавочных потерь, не поддающихся вполне точному учету.

Из этих потерь надо указать следующие:

а) Добавочные потери в железе якоря вследствие обработки якорного корпуса. Если готовый железный якорный корпус подвергнуть некоторой обработке,



Фиг. 197. Фиг. 198.

например обточке, опиловке и т. д., то при этом обычно несколько нарушается изоляция между листами железа благодаря появлению заусениц на железе, электрически соединяющих между собой отдельные якорные листы. Результатом этого является увеличение токов Фуко в железе, а вместе с тем и потерь. В силу этого ко всякой обработке листов железа, особенно уже собранных в якорь, следует относиться чрезвычайно осторожно.

б) Добавочные потери от токов Фуко в меди якоря вследствие проникновения магнитных линий во впадины.

Вследствие того, что часть магнитных линий из полюсов проходит из полюса в якорь через впадины (фиг. 197), а иногда при большом насыщении в основании зубцов и через боковые стороны зубца в нижнюю часть впадины (фиг. 198), получается неравномерная индукция в разных точках толстых медных проводов, вследствие чего в меди проводников начинают циркулировать токи Фуко. Опыты Ottenstein'а показывают, что до зна-

чений максимальной индукции в зубце в 24000—25000 магн. линий добавочные потери на эти токи невелики, далее же они начинают быстро возрастать. С этим приходится считаться при выборе максимальной индукции в зубцах, особенно учитывая увеличение этой индукции при нагрузке.

в) К таким же математически трудно учитываемым потерям относятся **потери в обмотке якоря от внутренних уравнительных токов** между отдельными параллельными цепями обмотки.

Об этих потерях мы говорили при рассмотрении обмоток.

Причинами уравнительных токов, вызывающих эти потери, как мы указывали, могут быть:

1) несимметрия обмотки;

2) эксцентричность расположения якоря в магнитном поле;

3) несимметрия самого поля отдельных полюсов вследствие дефектов материала, обработки и сборки машины.

Уравнительные токи и добавочные потери на них могут быть как при нагрузке, так и при холостом ходе.

г) Наконец к дополнительным потерям могут быть отнесены потери от токов Фуко в неизолированных болтах, стягивающих якорное железо. Для уменьшения их рекомендуется изолировать болты от железа якоря и располагать их (болты) ближе к внутреннему краю якорных листов.

Все эти добавочные потери учитывают суммарно, увеличивая сумму железных потерь на гистерезис и токи Фуко на 10%—30%. При нерациональной конструкции и неправильной обработке эти потери могут оказаться еще больше.

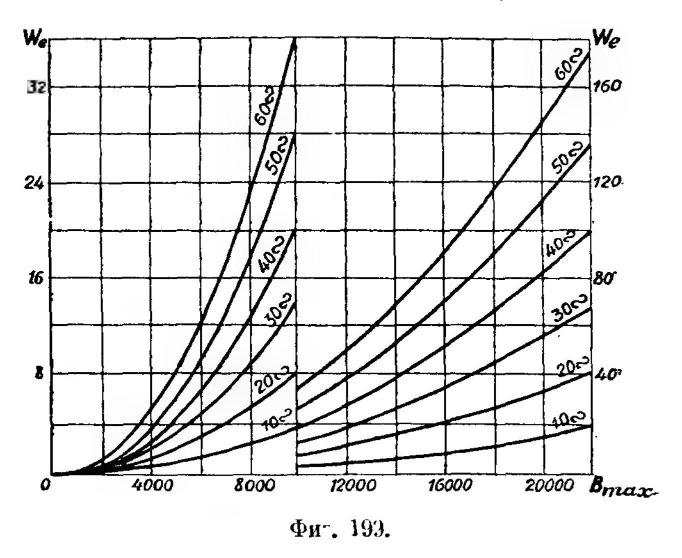
8. Суммарные потери в железе машины.

Отдельные железные потери на гистерезис и токи Фуко вычисляются, как указано в § 6. Суммарные железные потери мы получим, если сложим все отдельные потери на гистерезис и токи Фуко в железе якоря, зубцов и полюсных башмаков. Учитывая добавочные потери, получим следующее выражение для суммарных потерь в железе:

$$V_{ei} = (\text{от } 1{,}1 \text{ до } 1{,}3)(V_{ha} + V_{wa} + V_{hz} + V_{wz} + V_{hp} + V_{wp}) \text{ ватт.} \quad (356)$$

Для приближенных расчетов поступают следующим образом. Определяют лабораторным способом по образцам железа потери

на гистерезис и токи Фуко на 1 *дм*³ при разных частотах равномерным переменным полем (например прибором Эпштейна). Затем, зная объемы железа рассчитываемой машины и индукции B_a и $B_{z\,ср}$, определяют по опытным кривым (см. нижеприводимые кривые для якорного железа с потерями $V_{10} = 3{,}6\ \frac{ватт}{кг}$ при 10000 магн. линиях на фиг. 199) суммарные потери в железе сердечника якоря V_{ta} и в железе зубцов V_{tz} для соответствую-



Фиг. 199.

щих индукций B_a и B_z и частоты $c = \frac{pn}{60}$. Тогда общие потери в железе можно приближенно принять равными:

$$V_{ei} = (\text{от } 1{,}7 \text{ до } 2{,}0)\ (V_{ta} + V_{tz}) \text{ ватт} \quad . \ . \ . \ . \ (357)$$

Кривые железных потерь в ваттах на 1 *дм*³ при разных частотах для нормального динамного железа с потерями на 1 *кг* в 3,6 ватт при $B = 10000$ и 50 периодах показаны на фиг. 199.

9. Механические потери.

Механические потери составляются из потерь на трение в подшипниках, потерь на трение щеток, потерь на трение о воздух и потерь, обусловливаемых вибрацией машины.

Из этих потерь некоторому математическому расчету подаются лишь потери на трение в подшипниках и на трение щеток.

Обычно потери на трение определяются первоначально суммарно и приближенно, и затем принятые величины проверяются опытным путем при изготовлении пробных образцов машин. Такие опытные заводские данные дают твердые основания для довольно точного определения механических потерь в машинах с конструкциями, близкими к уже изготовлявшимся на заводе.

Опыты показывают, что суммарные потери на трение изменяются с изменением скорости. При увеличении скорости и механические потери увеличиваются, при чем увеличение их идет со степенью большей, чем первая, в зависимости от числа оборотов. Главные из механических потерь — потери на трение в подшипниках при скоростях до 4—5 метров в *сек* по окружности цапфы — при увеличении числа оборотов растут пропорционально 1,5 степени от числа оборотов.

Электрическое состояние машины на эти потери влияния не оказывает.

Parschall и Hobart дают для суммарных потерь на трение в эл. машинах следующие цифры, могущие служить исходными.

Быстроходные машины с ременным приводом: от 1 до 3% мощности машины при размерах машины от 400 kW до 60 kW и от 360 до 1500 оборотов в минуту.

Тихоходные машины: от 0,8 до 2% от мощности машины при мощности около 500 kW до 50 kW.

Большие тихоходные машины, непосредственно соединенные с паровыми машинами, имеют около $^1/_2$ и до 1% потерь на трение при мощностях от 1000 kW и ниже.

При очень быстроходных машинах потери на трение получаются значительно бо́льшими.

10. Коэффициент полезного действия электрических машин.

Под коэффициентом полезного действия (η) электрических машин, безразлично генераторов или двигателей, также как и других машин (паровых, водяных и пр.) и орудий, мы подразумеваем отношение полезной работы, получаемой от машины ($W_{полезн}$), к энергии, затраченной на приведение машины в действие ($W_{затрач}$).

$$\eta = \frac{W_{полезн}}{W_{затрач}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (358)$$

Энергия затраченная, подведенная к машине ($W_{затрач}$), с одной стороны идет на производство полезной работы ($W_{полезн}$), а с другой стороны расходуется на покрытие тех потерь, которые имеются во всякой машине ($\Sigma_{потерь}$). По закону сохранения энергии:

$$W_{затрач} = W_{полезн} + \Sigma_{потерь}, \qquad (359)$$

или

$$W_{полезн} = W_{затрач} - \Sigma_{потерь}. \qquad (360)$$

Отсюда выражение для коэффициента полезного действия может писаться различным образом:

$$\eta = \frac{W_{полезн}}{W_{затрач}} = \frac{W_{полезн}}{W_{полезн} + \Sigma_{потерь}} = \frac{W_{затрач} - \Sigma_{потерь}}{W_{затрач}}. \qquad (361)$$

Всеми этими выражениями и пользуются при вычислении коэффициента полезного действия электрических машин.

Первое выражение уместно в том случае, когда одинаково легко определять как полезную, так и затраченную энергию в машине (например когда при испытании электродвигателя мы имеем в распоряжении тормазное приспособление).

Вторая форма в выржении (361) для коэффициента полезного действия является удобной для вычисления и определения опытным путем в том случае, когда легко определяется полезная работа машины, и затем легче находится сумма потерь в машине, чем сразу величина энергии, затраченной на приведение в действие машины (как, например, в эл. генераторах). Последняя форма выражения (361) употребляется обычно при определении коэффициента полезного действия двигателей путем предварительного определения суммарных потерь в машине, когда определить сразу полезную работу двигателя представляется затруднительным (нет тормазных приспособлений или вспомогательного градуированного генератора).

При опытном определении коэффициента полезного действия можно различать две главных группы методов:

1) Методы непосредственного определения коэффициента полезного действия, при помощи измерения затраченной энергии и полезной работы.

2) Методы косвенные, при которых определяются потери в электрической машине и на основании их уже находится коэффициент полезного действия.

При этом потери определяются или:

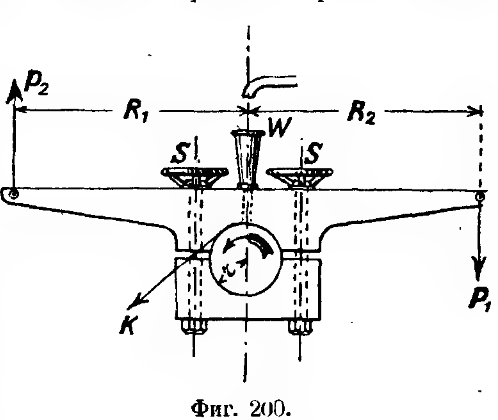
а) при помощи опыта холостого хода или

б) при помощи градуированных вспомогательных машин.

11. Определение коэффициента полезного действия двигателя по тормазной мощности.

Метод непосредственного определения коэффициента полезного действия чаще всего применяется при испытании двигателей, когда в распоряжении имеется тормазное приспособление. Из более употребительных тормазных устройств можно указать следующие:

а) Тормаз Прони (см. фиг. 200). Тормаз состоит из двух половин, стянутых винтами S,S. Увеличив при помощи нажимных маховичков (S,S) нажатие тормазных колодок на шкив и подвесив на одно плечо (R_2) тормаза груз P_1 *кг*, можно отрегулировать тормаз так, что коромысло тормаза окажется в равновесии,—это будет соответствовать состоянию, когда момент двигателя (M), равный моменту трения по шкиву Pr, будет равняться (и противоположно направлен) моменту груза, подвешенного к концу коромысла P_1R_2, т.-е.



Фиг. 200.

$$M = Pr = P_1R_2. \quad \ldots\ldots\ldots (362)$$

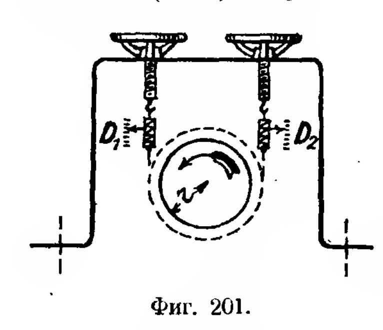
Иногда при значительных размерах тормазов для более легкого уравновешивания свободный конец тормаза присоединяют (подвешивают) к градуированной пружине (динамометру). В этом случае вращающий момент двигателя определяется как сумма моментов: момента от груза P_1 *кг* и от давления P_2 *кг* пружины динамометра:

$$M = P_1R_2 + P_2R_1 \text{ кг-м}. \quad \ldots\ldots\ldots (363)$$

Для получения большей уравновешенности тормаза последний рекомендуется делать с одинаковыми плечами $R_1 = R_2$. В про-

тивном случае пришлось бы к моменту двигателя M прибавить (или вычесть) момент избыточного веса тормазного плеча. Для охлаждения тормазных колодок и шкива в верхней части тормаза сделан прорез (W на фиг. 200), через который к шкиву подводится вода.

б) Другой, дифференциальный, тормаз показан на фиг 201. Тормазное приспособление состоит из полого внутри шкива, насаживаемого на вал мотора. Шкив по краям имеет ребордочки. Через шкив перекинута пеньковая веревка, делающая на шкиве несколько (2—3) оборотов. Концы веревки прикреплены к динамометрам (D_1, D_2). Динамометры подвешены к крючкам, которыми кончаются металлические стержни с нарезкой, вставленные в железную стойку. Веревка может быть натянута в большей или меньшей степени при помощи маховичков с резьбой во втулке, навинченных на упомянутые стержни. Для охлаждения с внутренней стороны полого шкива подводится вода. Подтягивая маховички, мы увеличиваем натяжение веревки и тем увеличиваем нагрузку испытуемого двигателя (увеличиваются натяжения пружин динамометров D_1 и D_2). Если показание динамометра D_1 будет P_1 *кг* и показание динамометра D_2 будет P_2 *кг*, то в этом случае вращающий момент двигателя будет равен:



Фиг. 201.

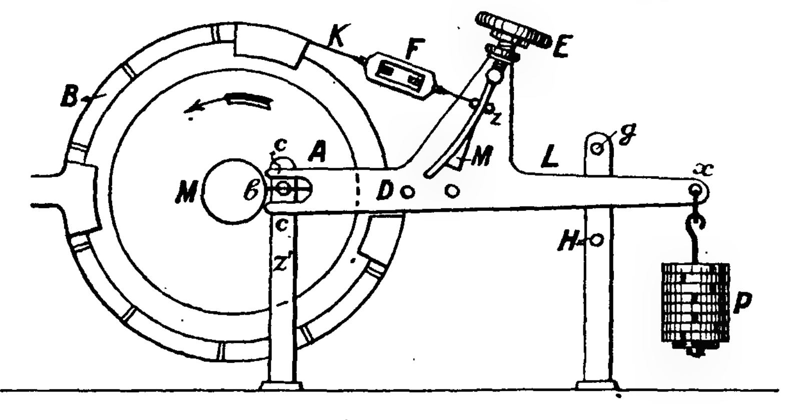
$$M = P_1 r - P_2 r = (P_1 - P_2) r \text{ кг-м}, \quad . \; . \; . \; . \; (364)$$

если r — радиус шкива — дан в метрах.

в) Несколько более сложным, но имеющим некоторые преимущества в смысле саморегулирования в небольших пределах изменения нагрузки, является тормаз Hubert'а (см. фиг. 202). Тормаз состоит из стальной ленты K, снабженной деревянными колодками B. Колодки при вращении мотора налегают на шкив. Один конец ленты присоединен к рычагу L, другой — к муфте F, при помощи которой эту ленту можно натянуть с желательной силой. Рычаг L с одной стороны снабжен вилкой со стальным эластичным язычком $в$, располагаемым между задержками неподвижной стойки ($г'$) $с—с$, а с другой — крючком для подвешивания груза P.

Торможение производится следующим образом:

Неподвижную стойку z' устанавливают так, чтобы язычок *в* и точка D прикрепления ленты к рычагу L были на одной горизонтали с осью вала двигателя. Затем, подвесив на крючок рычага x груз P *кг*, уравновешивают рычаг L в горизонтальном положении, регулируя сначала грубо муфтой F, а затем более точно винтом E. Винт E передвигает салазки z, тем самым в небольших пределах изменяя натяжение ленты K. Тормаз будет уравновешен, когда рычаг L примет горизонтальное положение и язычок *в* будет свободно играть между задержками c — c. В этот



Фиг. 102.

момент производят все отсчеты. Вращающий момент будет равен:

$$M = P \cdot l \text{ кг-м}, \quad \dots \dots \dots \quad (365)$$

где l есть плечо, равное расстоянию по горизонтали точки подвеса груза P от оси вала мотора в метрах.

Тормаз надевается на полый шкив, насаженный на вал мотора. Шкив, как в предыдущем случае, охлаждается водой, подаваемой во внутреннюю часть шкива.

Как мы сказали, тормаз обладает способностью саморегулирования в некоторых пределах изменения нагрузки. Действительно, если коэффициент трения почему-нибудь возрастает, то рычаг L повернется около точки A по направлению вращения двигателя, и натяжение ленты, а следовательно, и давление колодок на шкив станет меньше. Если же, наоборот, коэффициент трения на шкиве уменьшится, то рычаг L повернется в другую сторону,

и натяжение ленты увеличится. Таким образом уравновешивание этого тормаза происходит быстрее, чем тормаза Прони.

Существует еще ряд конструкций тормазов как механических, так и электрических, разобраться в устройстве которых обычно бывает не очень трудно в каждом отдельном случае.

Таким образом, зная плечо и груз тормаза, мы легко определяем вращающий момент двигателя *M кг-м*, а, отметив по тахометру число оборотов двигателя в одну минуту n, легко найдем и совершаемую двигателем на валу полезную работу за единицу времени:

$$W_{полезн} = \frac{2\pi \cdot n}{60} \cdot M \text{ кг-м}$$

$$= \frac{2\pi \cdot n}{60} \cdot \frac{M}{75} \text{ лош. с.}$$

$$= \frac{2\pi \cdot n}{60} \cdot M \, 9{,}81 \text{ ватт.} \quad \dots \quad (366)$$

С другой стороны, имея показания измерительных приборов, включенных в сеть двигателя (см. схемы фиг. 173, 174 и 175), находим энергию, затраченную на вращение двигателя:

$$W_{затрач} = E_k \, I_a + E_k \, i_в \quad \dots \dots \quad (367)$$

для шунтового и компаундного (с длинным шунтом) двигателя и

$$W_{затрач} = E_k \, I_a \quad \dots \dots \quad (368)$$

для последовательного двигателя.

Отсюда найдем коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta_{дв} = \frac{W_{полезн}}{W_{затрач}} \quad \dots \dots \quad (369)$$

Например для шунтового двигателя и простого тормаза Прони с нагрузкой только на одном плече рычага имеем:

$$\eta_{ш. дв} = \frac{2\pi \cdot n \cdot 9{,}81 \cdot P \cdot}{60 \cdot E_k (I_a + i \;)} \quad \dots \dots \quad (370)$$

12. Определение коэффициента полезного действия аггрегата из двух эл. машин постоянного тока.

В случае, если мы имеем аггрегат, состоящий из двух машин постоянного тока, непосредственно соединенных между собой, из которых одна машина работает двигателем, а другая генератором [1]), то определение коэффициента полезного действия такого полного аггрегата производится очень просто на основании показаний измерительных приборов как со стороны двигателя, так и со стороны генератора. Действительно, энергия, затрачиваемая на приведение в действие всего генератора, определяется из показаний приборов двигателя (предполагаем шунтовой):

$$W_{затрач}\,E_{k\ дв}\,(I_{дв}+i_{в.\ дв}). \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (371)$$

С другой стороны, полезная энергия, которую аггрегат отдает в сеть, равняется:

$$W_{полезн}=E_{k\ ген}\,I_{ген.\ внешн} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (372)$$

Отсюда коэффициент полезного действия всего аггрегата равняется:

$$\eta_{аггр}=\frac{W_{полезн}}{W_{затрач}}=\frac{E_{k\ ген}\,I_{ген.\ внешн}}{E_{k\ дв}\,(I_{дв}+i_{в.\ дв})}. \quad . \quad . \quad (373)$$

Схемами соединений обеих машин при испытании являются нормальные схемы двигателя и генератора, как они были указаны выше (фиг. 154—157; 173—175).

Этим же методом (методом аггрегата) пользуются иногда для приближенного определения коэффициента полезного действия отдельных машин. Именно, соединяют непосредственно муфтой две одинаковые машины или машины приблизительно одинаковой мощности, рассчитанные на одно и то же число оборотов, и затем заставляют одну машину работать двигателем и другую машину нагружают как генератор. Отмечают по показаниям приборов, как указано выше, $W_{полезн}$ и $W_{затрач}$ для всего аггрегата. Для машин одинаковых мощностей принимают равными их коэффициенты полезного действия при одинаковой нагрузке вне зависимости от того, работают ли машины генератором или двигателем. Тогда:

$$\eta_{аггр}=\eta_{дв}\cdot\eta_{ген}=\frac{W_{полезн}}{W_{затрач}}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (374)$$

[1]) Такие мотор-генераторы служат иногда для преобразования постоянного тока одного напряжения в постоянный же ток другого напряжения.

При равенстве коэффициентов полезного действия двигателя и генератора имеем:

$$\eta_{дв} = \eta_{ген} = \sqrt{\eta_{агр}} = \sqrt{\frac{W_{полезн}}{W_{затрач}}} \quad . . . (375)$$

Для шунтовых машин получится:

$$\eta_{дв} = \eta_{ген} = \sqrt{\frac{E_{k\ ген}\ I_{ген.\ внешн}}{E_{k\ дв}\ (I_{дв} + i_{в\ дв})}} \quad . . . (376)$$

при чем предполагается, что генератор работает с самовозбуждением.

Так как на самом деле в этот момент нагрузки токи в якоре, в двигателе и в генераторе будут несколько разниться ($I_{дв} > I_{a\ ген}$ при одинаковых напряжениях), то полученный таким образом (выражение 376) коэффициент полезного действия мы считаем относящимся к средней нагрузке $I_a = \frac{I_{a\ дв} + I_{a\ ген}}{2}$ при одинаковом напряжении ($E_{k\ ген} = E_{k\ дв}$).

Метод в применении к отдельным машинам в силу сделанных допущений является, очевидно, приближенным.

13. Определение коэффициента полезного действия эл. машин постоянного тока методом возвратной работы (метод Рэлея и Каппа).

Настоящий метод является переходным от методов с непосредственным определением коэффициента полезного действия (метод аггрегата) к методам косвенным, описываемым далее. По сравнению с методом аггрегата метод возвратной работы представляет то преимущество, что энергия, вырабатываемая генератором при испытании, не теряется даром в балластном сопротивлении, а поступает в двигатель, приводящий во вращение весь испытуемый аггрегат, таким образом, что только недостающая часть энергии, идущая на потери в наших машинах, пополняется из сети. Таким образом этот способ является весьма экономичным и применяется часто там, где одновременно имеется или изготовляется несколько однотипных машин.

Машины соединяются между собой муфтой непосредственно и запускаются вместе так, что одна машина работает в качестве генератора, а другая в качестве двигателя, приводящего этот

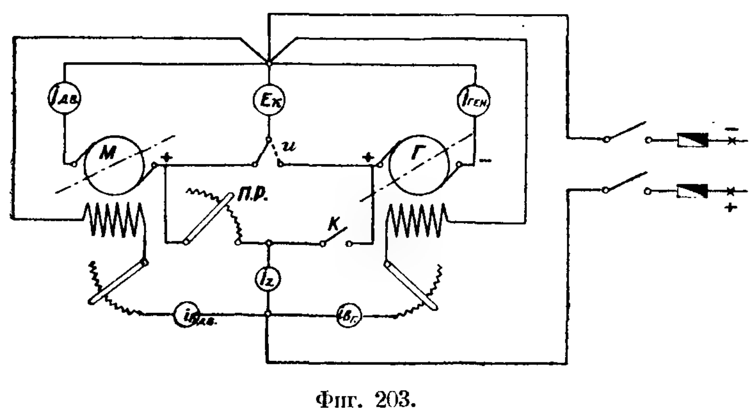
генератор во вращение. Схема эл. соединений при испытании показана на фиг. 203.

Энергия, затрачиваемая на вращение такого мотор-генераторного агрегата при соединении по схеме фиг. 203, равняется:

$$W_{затрач} = E_k I_{дв} + E_k i_{в\,дв} + E_k i_{в\,ген} = E_k (I_{дв} + i_{в\,дв} + i_{в\,ген}) =$$
$$= E_k I_{ген} + E_k I_z + E_k i_{в\,дв} + E_k i_{в\,ген} = E_k (I_{ген} + I_z +$$
$$+ i_{в\,дв} + i_{в\,ген}). \quad \ldots \ldots \quad (377)$$

Энергия полезная есть энергия, отдавная якорем генератора

$$W_{полезн} = E_k I_{ген}. \quad \ldots \ldots \quad (378)$$



Фиг. 203.

Отсюда коэффициент полезного действия агрегата равен:

$$\eta_{агр} = \frac{W_{полезн}}{W_{затрач}} = \frac{E_k I_{ген}}{E_k (I_{дв} + i_{в\,дв} + i_{ген})} = \frac{I_{ген}}{I_{дв} + i_{в\,дв} + i_{в\,ген}} =$$
$$= \frac{E_k I_{ген}}{E_k (I_{ген} + I_z + i_{в\,дв} + i_{в\,ген})} = \frac{I_{ген}}{I_{ген} + I_z + i_{в\,дв} + i_{в\,ген}} \cdot (379)$$

Отсюда коэффициент полезного действия каждой машины в отдельности в предположении, что $\eta_{ген} = \eta_{дв}$ (см. предыдущий параграф), равен:

$$\eta_{ген} = \eta_{дв} = \eta_{агр} = \sqrt{\frac{I_{ген}}{I_{дв} + i_{в\,дв} + i_{в\,ген}}} =$$
$$= \sqrt{\frac{I_{ген}}{I_{ген} + I_z + i_{в\,дв} + i_{в\,ген}}} \quad \ldots \ldots \quad (380)$$

для силы тока $I = \frac{I_{ген} + I_{дв}}{2}$.

Машины иногда соединяют по схеме, указанной на фиг. 204, отличающейся от схемы фиг. 203 только включением амперметра для добавочного тока I_z. В этом случае

$$W_{затрач} = E_k(I_{дв} + i_{в\,дв} + i_{в\,ген}) = E_k(I_{ген} + I_z) \quad . \; . \; . \quad (381)$$

Энергия полезная попрежнему равна:

$$W_{полезн} = E_k I_{ген} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (382)$$

Фиг. 204.

и коэффициент полезного действия каждой машины равен:

$$\eta_{ген} = \eta_{дв} = \sqrt{\frac{I_{ген}}{I_{дв} + i_{в\,дв} + i_{в\,ген}}} = \sqrt{\frac{I_{ген}}{I_{ген} + I_z}} \quad (383)$$

для силы тока $I = \frac{I_{ген} + I_{дв}}{2}$.

Пуск в ход аггрегата происходит при выключенном рубильнике k при помощи пускового реостата *П.Р.* Затем регулируют напряжение генератора *Г* так, чтобы оно равнялось напряжению на зажимах двигателя *М*, и тогда уже включают рубильник k (проверив, конечно, предварительно правильность полярности зажимов машин). Нагружают машины и регулируют число оборотов обычным способом, при чём необходимо помнить, что изменение тока возбуждения в одной машине сказывается одновременно и на числе оборотов аггрегата и на величине нагрузки обеих машин, что при резком изменении сопротивления в шунтовых реостатах легко может повести к сильной перегрузке и перегреву машин.

14. Определение коэффициента полезного действия электрических машин постоянного тока по методу холостого хода.

Из косвенных методов определения коэффициента полезного действия наиболее распространенным является метод холостого хода. Распространенность его объясняется возможностью, пользуясь этим методом, легко, без сложных приспособлений (без тормазных устройств) определить потери, а через них и коэффициент полезного действия машин с большой точностью.

Сущность метода холостого хода заключается в том, что запускают испытуемую машину (безразлично, испытывают ли генератор или двигатель) в качестве двигателя вхолостую без нагрузки и отмечают потребляемую машиной, работающей двигателем, электрическую энергию из сети ($E_{к_0} I_0 + E_{к_0} i_{в_0}$ для шунтовой машины). Так как полезная работа машины при этом равна нулю, то, следовательно, вся потребляемая двигателем энергия идет на потери в нем. Здесь делается допущение, что потери машины, работающей двигателем вхолостую, и потери нагруженной машины, работающей генератором (или нагруженным двигателем, если мы испытываем двигатель), будут одинаковы. Очевидно, это допущение правильно только при определенных условиях. Для того чтобы выяснить эти условия, необходимо рассмотреть те потери, какие имеют место в машинах постоянного тока, и выяснить, какие величины и условия влияют на размеры этих потерь.

Как мы видели из предыдущего изложения, в электрических машинах постоянного тока имеются следующие потери:

$$\Sigma_{потерь} = \underbrace{V_a' + V_u + V_{ht} + V_{wt} + V_n}_{\text{электрические потери}} +$$

$$+ \underbrace{\underbrace{V_{ha} + V_{hz} + V_{hp}}_{\text{потери на гистерезис}} + \underbrace{V_{wa} + V_{wz} + V_{wp}}_{\text{потери на токи Фуко}} + \underbrace{\Delta(V_h + V_w)}_{\text{добавочные железные потери}}}_{\text{магнитные или железные потери}} +$$

$$+ \underbrace{V_R + V_r}_{\text{механические потери}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (384)$$

Более суммарно можно написать:

$$\Sigma_{потерь} = V_{эл} + V_{магн} + V_{мех} \quad \ldots \ldots \quad (385)$$

Из этих трех групп потерь электрические потери зависят почти исключительно от сопротивлений обмоток и переходного слоя между щетками и коллектором, с одной стороны, и от тока в этих обмотках, с другой стороны.

В практических испытаниях машин электрические потери не вычисляют так точно, как было указано нами выше, и принимают их равными:

$$V_{эл} = I_a^2 R_a + I_в^2 R_в + i_в^2 r_n, \quad \ldots\ldots \quad (386)$$

где

I_a — ток в якоре;

$I_в$ — ток в последовательной обмотке возбуждения и обмотке дополнительных полюсов;

$i_в$ — ток в шунтовой обмотке возбуждения;

R_a — сопротивление якоря, включая сюда и сопротивление контакта щеток;

$R_в$ — сопротивление последовательной обмотки возбуждения и обмотки дополнительных полюсов вместе;

r_n — сопротивление шунтовой обмотки возбуждения (большею частью берут r_n — сопротивление всей цепи шунта).

Вторая группа потерь (магнитные или железные) состоит из потерь на гистерезис и на токи Фуко

$$V_{магн} = V_h + V_w. \quad \ldots\ldots \quad (387)$$

Из них потери на гистерезис пропорциональны, с одной стороны, частоте вращения, или числу оборотов, а, с другой стороны, магнитной индукции в машине во второй степени. Остальные величины, входящие в выражения для потерь на гистерезис для определенной машины, являются постоянными. В силу этого можно положить:

$$V_h = c_h \cdot n \cdot B^2. \quad \ldots\ldots \quad (388)$$

Потери на токи Фуко также зависят от частоты или числа оборотов и от магнитной индукции, при чем здесь зависимость квадратичная как от магнитной индукции, так и от числа оборотов. Остальные величины, влияющие на эти потери, также для определенной машины являются постоянными.

Потери на токи Фуко могут быть приняты равными:

$$V_w = c_w n^2 B^2. \quad \ldots\ldots \quad (389)$$

Суммарно магнитные потери являются функцией только двух переменных величин n и B (для динамомашины).

$$V_{магн} = f(n, B). \quad \ldots \quad (390)$$

Механические потери ($V_{мех}$) являются функцией только числа оборотов; остальные величины, влияющие на эти потери, для определенной машины могут быть приняты за постоянные.

$$V_{мех} = f(n). \quad \ldots \quad (391)$$

Таким образом, возвращаясь к определению потерь методом холостого хода, мы сразу можем сказать, что первые, т.-е. электрические, потери при работе машины с нагрузкой и двигателем вхолостую будут разные. Следовательно эти потери надо определять как-нибудь иначе, а не холостым ходом.

Так как для определения электрических потерь (см. выражения 318, 322, 325 и 328 для них) необходимо знать лишь сопротивление обмоток и ток в них, то нахождение этих потерь не представляет никаких трудностей.

Методом амперметра и вольтметра или мостиком определяем сопротивления обмоток R_a, R_s и r_n при неподвижных машинах и при работе машины с нагрузкой, по показаниям амперметров отмечаем токи I_a, I_s и $i_в$. На основании этих данных мы можем найти и потери на нагревание обмоток.

$$V_{эл} = I_a^2 R_a + I_s^2 R_s + i_в^2 r_n. \quad \ldots \quad (392)$$

Таким образом опыт холостого хода нам нужно использовать лишь для нахождения остальных потерь, т.-е. только потерь магнитных ($V_{магн}$) и механических ($V_{мех}$). Для того чтобы исключить могущую произойти ошибку от того, что при холостом ходе электрические потери в машине будут другие, чем при нагрузке, рассуждаем следующим образом. Вся энергия, забираемая двигателем вхолостую, расходуется на потери в машине. В силу этого мы можем написать (предполагаем шунтовую машину):

$$E_{ko} + I_0 E_{ko} i_{во} = I_0^2 R_a + i_{во}^2 R_n + V_{магн} + V_{мех}. \quad (393)$$

Как мы уже говорили выше

$$E_{ko} i_{во} = i_{во}^2 R_n, \quad \ldots \quad (394)$$

т.-е. вся энергия, поступающая в цепь шунта, тратится на нагревание цепи шунта. Отсюда, сокращая эти величины в левой и правой части получим:

$$E_{k_0} I = I_0^2 R_a + V_{магн} + V_{мех}, \quad . \ . \ . \ . \ (395)$$

или

$$V_{магн} + V_{мех} = E_{k_0} I_0 - I_0^2 R_a, \quad . \ . \ . \ . \ . \ (396)$$

то-есть вся энергия, которая поступает в якорь, за вычетом энергии, идущей на нагревание якоря, тратится на магнитные и механические потери и определяет величину этих потерь.

Нам остается еще рассмотреть, будут ли и при каких условиях магнитные и механические потери одинаковыми при работе машины двигателем вхолостую и при работе ее с нагрузкой.

Выше мы видели, что изменение магнитных потерь в определенной машине зависит лишь от изменения числа оборотов и магнитной индукции, а механические только от изменения числа оборотов:

$$V_0 = V_{магн} + V_{мех} = f(n, B). \quad . \ . \ . \ . \ . \ (397)$$

Отсюда следует, что если мы в опыте холостого хода при работе машины двигателем вхолостую дадим ей то же число оборотов и ту же магнитную индукцию, которые она имела при работе с нагрузкой генератором (или двигателем с нагрузкой, если испытуемая машина — двигатель), то магнитные и механические потери в машине при холостой работе ее двигателем будут те же, что и при работе с нагрузкой (генератором или двигателем, смотря по тому, какую машину мы испытываем), при чем эти потери определятся величиной:

$$V_0 = E_{k_0} I_0 - I_0^2 R_a \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ (398)$$

Потери эти ($V_0 = V_{магн} + V_{мех}$) и называются потерями холостого хода[1]) в силу того, что они определяются из опыта холостого хода.

Остается только один вопрос, каким образом установить, что число оборотов и магнитная индукция при опыте холостого хода

[1]) Это не должно означать, что при холостом ходе двигателя будут только магнитные и механические потери. Как мы видели (см. вы-ие 393), при холостом ходе двигателя имеются и электрические потери, но их мы исключаем из расчета, как определяемые отдельно.

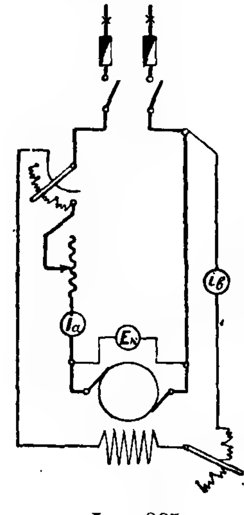
и при работе машины с нагрузкой одинаковы. Равенство числа оборотов устанавливается очень легко по показаниям тахометра. Что же касается равенства магнитных индукций, то при испытании машин постоянного тока обычно удовлетворяются установлением лишь одинакового тока в обмотке возбуждения при холостом ходе и при нагрузке. Конечно при таких условиях можно лишь приближенно считать, что (при равенстве токов возбуждения) магнитные потоки и индукции будут в машине в обоих случаях одинаковы, так как здесь мы пренебрегаем действием реакции якоря на главный магнитный поток при нагрузке и при холостом ходе. Если при холостом ходе в силу малости тока в якоре влияние реакции якоря является действительно очень малым, то при нагрузке действие реакции якоря оказывается уже заметным.

Далее нами будет указано, как можно учесть влияние реакции якоря при выполнении опыта холостого хода и более точно установить равенство магнитных индукций при холостом ходе и нагрузке.

Для более приближенных практических испытаний, как мы сказали, обычно удовлетворяются установлением при холостом ходе того же тока возбуждения, какой имелся в машине при работе с нагрузкой. Таким образом, если бы мы имели целый ряд опытов холостого хода, проделанных при разных условиях, то не все они могли бы быть использованы для определения механических и магнитных потерь, а только те, при проведении которых число оборотов и ток возбуждения в машине были те же самые, какие были в машине при нагрузке. Например, если бы требовалось определить магнитные и механические потери для некоторого генератора при нагрузке его внешним током в 24 ампера, при чем машина имела напряжение $E_k = 110$ вольт, ток возбуждения $i_в = 1{,}0$ ампер, число оборотов $n = 1800$ в мин., сопротивление якоря $R_a = 0{,}4\,\Omega$, сила тока в якоре $I_a = I_{вн} + i_в = 24 + 1 = 25$ ампер, то для определения в этом случае магнитных и механических потерь было бы необходимо произвести опыт холостого хода при совершенно определенных условиях. Именно, из трех приведенных ниже опытов холостого хода использовать для определения потерь холостого хода можно только один опыт. Пусть данные этих трех опытов холостого хода будут следующие:

	1-й опыт	2-й опыт	3-й опыт	
E_{k_0}	110	116	110	вольт
I_0	2,1	2,2	2,05	ампер
$i_{во}$	1,0	1,0	0,9	ампер
n_0	1700	1800	1800	обор. в мин.
$V_0 = E_{k0} I_0 - I_0^2 R_a$	214	236	209	ватт

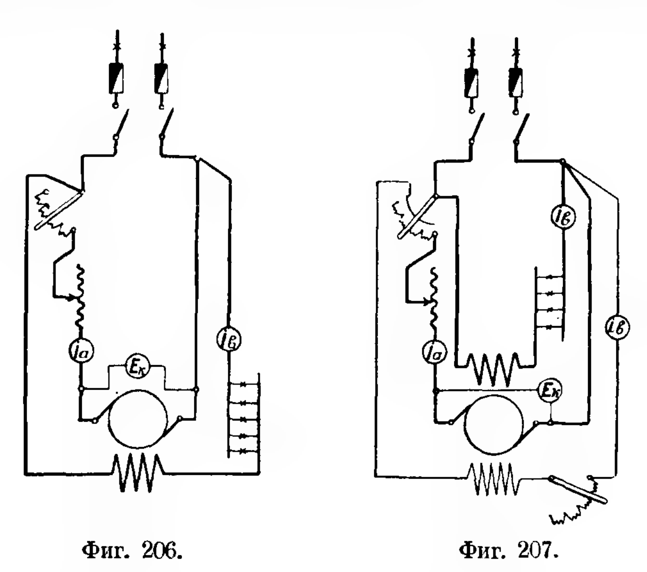
Из этих опытов можно для определения магнитных и механических потерь воспользоваться данными только второго опыта, при котором число оборотов ($n = 1800$) и ток возбуждения ($i_{во} = 1{,}0$) являются одинаковыми с числом оборотов и током возбуждения при нагрузке (см. выше). Данные первого и третьего опытов дали бы нам эти потери меньшими, чем они были при работе машины нагруженным генератором: в первом опыте число оборотов при холостом ходе меньше числа оборотов при работе с нагрузкой, а в третьем опыте, хотя число оборотов при холостом ходе и при нагрузке одинаковое, но ток возбуждения при холостом ходе меньше, чем при нагрузке. Таким образом в этом случае потери магнитные и механические определяются в 236 ватт.



Фиг. 205.

Схема опыта холостого хода для шунтовой машины показана на фиг. 205. Эта схема отличается от нормальной схемы шунтового двигателя лишь наличием добавочного регулировочного реостата, последовательно включенного в цепь якоря. Включение последнего объясняется необходимостью регулировать число оборотов двигателя при холостом ходе, не трогая шунтового реостата, влияя лишь на напряжение, подводимое к зажимам якоря. Действительно, как мы видели, в опыте холостого хода необходимо одновременно держать ток возбуждения и число оборотов такими же, какими они были при нагрузке. Для поддержания того же тока возбуждения после пуска в ход машины

двигателем регулируют ток в шунтовой обмотке, изменяя сопротивление в шунтовом реостате. При этом, однако, число оборотов двигателя получается иное, чем при работе машины с нагрузкой. Для отрегулирования числа оборотов на нужную величину мы уже не можем более пользоваться цепью шунта, так как иначе изменится ток возбуждения и, следовательно, изменятся магнитные потери. Единственной возможностью, таким образом, остается регулировать число оборотов, меняя напряжение на зажимах якоря машины, что мы и предвидели в схеме. При регулировании в небольших пределах при малых силах тока во время



Фиг. 206. Фиг. 207.

холостого хода иногда бывает возможно для этой цели вместо специального реостата пользоваться пусковым реостатом.

Если испытывается не шунтовая машина, а машина с последовательным возбуждением или компаундная, то при опыте холостого хода последовательную обмотку приходится переключать и запускать машину двигателем по схеме фиг. 206 для последовательной машины и фиг. 207 для компаундной.

Последовательную обмотку, как мы видим из схем, необходимо включить параллельно с якорем и шунтовой обмоткой для того, чтобы в опыте холостого хода можно было регулировать ток возбуждения не только в шунтовой обмотке, но и в последовательной и установить эти токи такими же, какими были токи в этих обмотках при нагрузке, и тем создать одина-

ковые магнитные условия для потерь при холостом ходе и нагрузке. При нормальной схеме ток в последовательной обмотке установился бы одинаковый с током холостого хода в якоре, т.-е. значительно меньший, чем при нагрузке. В последовательной машине иначе и вообще нельзя было бы запустить машину двигателем вхолостую, так как при нормальной схеме, как мы знаем, двигатель вхолостую разносит. Энергия, которая при этом поступает в последовательную или компаундную обмотку, так же, как и энергия, идущая в цепь шунта, целиком идет на нагревание сопротивлений этих цепей и при определении этим опытом магнитных и механических потерь не должна учитываться.

При включении последовательных обмоток в шунт необходимо помнить, что сопротивление этих обмоток очень мало, а сила тока, проходящего по ним, велика, и соответственно этому подбирать регулировочные сопротивления для цепей этих обмоток.

Когда бывают определены электрические потери и потери холостого хода, легко бывает уже вычислить и коэффициент полезного действия машины.

Если испытуемая машина нормально работает генератором, то ее коэффициент полезного действия определяется из соотношения:

$$\eta_{ген} = \frac{W_{полезн}}{W_{полезн} + \Sigma_{потерь}} = \frac{E_k \cdot I_{внешн}}{E_k I_{внешн} + V_{эл} + V_0} =$$

$$= \frac{E_k \cdot I_{внешн}}{E_k I_{внешн} + I_a^2 R_a + I_в^2 R_в + E_k i_в + E_{k_0} I_0 - I_0^2 R_a} \quad . \; . \; . \; (399)$$

Для двигателя коэффициент полезного действия вычисляется следующим образом:

$$\eta_{дв} = \frac{W_{затр} - \Sigma_{потерь}}{W_{затр}} = \frac{E_k i_a + E_k i_в - V_{эл} - V_0}{E_k I_a + E_k i_в} =$$

$$= \frac{E_k I_a + E_k i_в - I_a^2 R_a - I_в^2 R_в - E_k i_в - E_{k_0} I_0 + I_0^2 R_a}{E_k (I_a + i_в)} =$$

$$= \frac{E_k I_a - I_a^2 R_a - I_в^2 R_в - E_{k_0} I_0 + I_0^2 R_a}{E_k (I_a + i_в)} \quad . \; . \; . \; . \; (400)$$

15. Определение коэффициента полезного действия при помощи вспомогательной градуированной машины.

Если при испытании машины мы имеем еще другую вспомогательную машину, коэффициент полезного действия которой нам известен для разных условий работы (для разных чисел оборотов и разных величин тока возбуждения), то определение коэффициента полезного действия нашей машины может быть произведено очень просто.

Если вспомогательная машина одинаковой или большей мощности, чем испытуемая, то коэффициент полезного действия испытуемой машины может быть найден непосредственным определением. Действительно, в этом случае поступаем следующим образом. Соединяем муфтой испытуемую машину с вспомогательной и полученный аггрегат запускаем как мотор-генератор. Если испытуемая машина — генератор, вспомогательную машину заставляем работать двигателем. Полезную работу генератора находим как произведение напряжения его на силу тока, отдаваемую во внешнюю сеть:

$$W_{\text{полезн ген}} = E_{\text{к ген}} I_{\text{ген внешн.}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (401)$$

Что касается мощности, затраченной на приведение в действие генератора, то ее мы находим, исходя из мощности, потребляемой двигателем из сети. В самом деле, если двигатель забирает из сети мощность (предполагаем шунтовой двигатель),

$$W_{\text{дв затр}} = E_{\text{к дв}} (I_{\text{дв}} + i_{\text{в дв}}), \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (402)$$

то при этом известном коэффициенте полезного действия вспомогательного двигателя:

$$\eta = \frac{W_{\text{дв полезн}}}{W_{\text{дв затрач}}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (403)$$

полезная мощность, развиваемая двигателем на валу будет равняться:

$$W_{\text{дв полезн}} = W_{\text{дв затрач}} \cdot \eta_{\text{дв}} = E_{\text{к дв}} (I_{\text{дв}} + i_{b\ \text{дв}})\ \eta_{\text{дв}} . \quad (404)$$

Очевидно вся эта полезная мощность тратится на приведение в действие генератора, т.-е.

$$W_{\text{ген. затрач}} = W_{\text{дв. полезн}} = E_{k\ \text{дв}} (I_{\text{дв}} + i_{\text{в дв}}) \cdot \eta_{\text{дв}} \quad . \quad . \quad (405$$

Отсюда коэффициент полезного действия испытуемого генератора будет равняться:

$$\eta_{ген} = \frac{W_{полезн\ ген}}{W_{затрач\ дв}\ \eta_{дв}} = \frac{E_{k\,ген}\ I_{ген\ внешн}}{E_{k\,дв}\ (I_{дз} + i_{в\ дв})\cdot\eta_{дв}}. \quad (406)$$

В случае, если испытуемая машина — двигатель, при соединении этого двигателя со вспомогательной машиной последнюю мы заставляем работать как генератор. В этом случае мы непосредственно находим затраченную энергию испытуемого двигателя

$$W_{дв\ затрач} = E_{к\,дв}\ (I_{дв} + i_{в\ дв}) \quad \ldots\ldots (407)$$

Полезную же работу двигателя находим, исходя из энергии, отдаваемой вспомогательным генератором в сеть:

$$W_{ген\ полезн} = E_{k\,ген}\ I_{ген\ внешн} \quad \ldots\ldots (408)$$

Зная коэффициент полезного действия этого генератора

$$\eta_{ген} = \frac{W_{ген\ полезн}}{W_{ген\ затрач}}, \quad \ldots\ldots (409)$$

можем найти затраченную на вращение генератора энергию

$$W_{ген\ в\ :трач} = \frac{W_{ген\ полезн}}{\eta_{ген}} = \frac{E_{к\,ген}\ I_{ген\ внешн}}{\eta_{ген}}. \quad \ldots (410)$$

Эта энергия, очевидно, равна полезной работе, развиваемой испытуемым двигателем

$$W_{дв\ полезн} = W_{ген\ затрач} = \frac{E_{k\,ген}\ I_{ген\ внешн}}{\eta_{ген}} \quad \ldots (411)$$

Отсюда:

$$\eta_{дв} = \frac{W_{дв\ полезн}}{W_{дв\ затрач}} = \frac{E_{k\,ген}\ I_{ген\ внешн}}{\eta_{ген}\ E_{к\,дв}\ (I_{дв} + i_{в\ дв})}. \quad \ldots (412)$$

Очевидно, для этого метода испытания машин необходимо иметь ряд кривых коэффициентов полезного действия вспомогательной машины, определенных для работы ее и как генератором и как двигателем при разных нагрузках, разных числах оборотов и разных возбуждениях. При испытании значения для $\eta_{ген.всп}$ и $\eta_{дв.\ всп}$ берутся по этим кривым для той же нагрузки, того же числа оборотов и того же тока возбуждения, какое вспомогательная машина имела при испытании исследуемой машины.

Чаще вспомогательную машину берут меньшей мощности, чем испытуемая, и с ее помощью определяют коэффициент полезного действия не непосредственно, а косвенным способом, находя предварительно потери исследуемой машины. Испытание в этом случае ведут следующим образом. Электрические потери испытуемой машины определяют расчетом по сопротивлениям обмоток и по току, текущему в них, так же, как и в методе холостого хода.

Механические и магнитные потери находят, приводя в движение нашу машину вспомогательным двигателем. Испытуемая машина вращается как генератор без нагрузки, но с возбуждением, причем число оборотов и ток возбуждения устанавливаются (регулируя вспомогательный двигатель) такие же, какие машина имела при работе с нагрузкой (чтобы получились в этом случае те же самые магнитные и механические потери, какие были при нагрузке).

Пусть энергия, которую забирает вспомогательный двигатель из сети, равняется:

$$W_{всп\ затрач} = E_{к\ всп}\,(I_{всп} + i_{в\ всп}). \quad . \quad . \quad . \quad (413)$$

При известном коэффициенте полезного действия вспомогательного двигателя $\eta_{всп}$ (взятого для соответствующей нагрузки этого двигателя, соответствующего числа оборотов и возбуждения) энергия, затраченная на валу испытуемой машины, равняется:

$$W_{исп\ затрач} = \eta_{всп}\,W_{всп\ затрач} = \eta_{всп}\,E_{k\ всп}\,(I_{всп} + i_{в\ всп}) \quad (414)$$

Эта энергия, очевидно, идет целиком на потери в испытуемой машине. При отсутствии тока в якоре ее и независимом возбуждении потери будут заключаться лишь в механических и магнитных потерях. Отсюда:

$$V_0 = V_{мех} + V_{магн} = \eta_{всп}\,E_{к\ всп}\,(I_{всп} + i_{в\ всп}). \quad . \quad (415)$$

Зная потери, мы можем уже найти и коэффициент полезного действия. Если испытуемая машина — генератор, ее коэффициент полезного действия будет равен (предполагаем шунтовую машину):

$$\eta_{ген} = \frac{E_{кг} I_{г\ внешн}}{E_{кг} I_г + I_a^2 R_a + E_{кг} i_в + V_0}. \quad . \quad . \quad . \quad (416)$$

Для двигателя

$$\eta_{дв} = \frac{E_{k\,дв} \cdot I_{дв} - I_{дв}^2 R_a - V_0}{E_{k\,дв}\,(I_{дв} + i_{в\,дв})} \quad . \; . \; . \; . \; . \; (417)$$

Имея градуированный двигатель, легко найти и отдельно каждые потери: механические, магнитные и даже электрические в якоре (при чем для определения последних в этом случае не требуется знать и сопротивления обмотки якоря и контакта щеток). Для этой цели приводим испытуемую машину при помощи вспомогательного двигателя во вращение. Сначала вращаем машину не только без нагрузки, но и без возбуждения при нормальном для машины числе оборотов, с которым она работает при нагрузке. Тогда полезная энергия, затрачиваемая вспомогательным двигателем на вращение испытуемой машины, пойдет только на механические потери в ней и величина их будет равняться:

$$V_{мех} = \eta'_{всп}\, E'_{к\,всп}\,(I'_{всп} + i'_{в\,всп}) \quad . \; . \; . \; . \; . \; (418)$$

Дав теперь возбуждение машине (независимое), но не нагружая, вращаем ее вспомогательным двигателем при том же числе оборотов. Полезная энергия, затрачиваемая вспомогательным двигателем на вращение испытуемой машины, определит сумму механических и магнитных потерь:

$$V_0 = V_{мех} + V_{магн} = \eta''_{всп}\, E''_{к\,всп}\,(I''_{всп} + i''_{в\,всп}) \; . \; . \; (419)$$

Отсюда магнитные потери в машине будут равны:

$$V_{магн} = V_0 - V_{мех} = \eta''_{всп} \cdot E''_{к\,всп}\,(I''_{всп} + i''_{в\,всп} -$$
$$- \eta'_{всп} \cdot E'_{к\,всп}\,(I'_{всп} + i'_{в\,всп}) \quad . \; . \; . \; . \; . \; (420)$$

Если теперь, сохранив прежнее число оборотов, мы уменьшим до минимальных размеров возбуждение, замкнем через амперметр на короткое зажимы якоря и установим в якоре ток, равный току машины при нагрузке, то полезная работа вспомогательного двигателя определит нам суммарные потери в машине, механические и электрические в якоре, так как вследствие малого тока возбуждения при коротком замыкании магнитные потери будут незначительны и ими можно пренебречь. Тогда:

$$V_1 = V_{мех} + V_{эл.\,як} = \eta'''_{всп} \cdot E'''_{k\,всп}\,(I'''_{всп} + i'''_{всп}) \quad (421)$$

Отсюда электрические потери в якоре будут равны:

$$V_{эл.\ як} = I_a^2 R_a = V_1 - V_{мех} = \eta'''_{всп}\, E'''_{k\ всп}\, (I'''_{всп}) + i'''_{в\ всп}) - \\ - \eta'_{всп} \cdot E'_{k\ всп} (I'_{всп} + i'_{в\ всп}) \quad \ldots \ldots \quad (422)$$

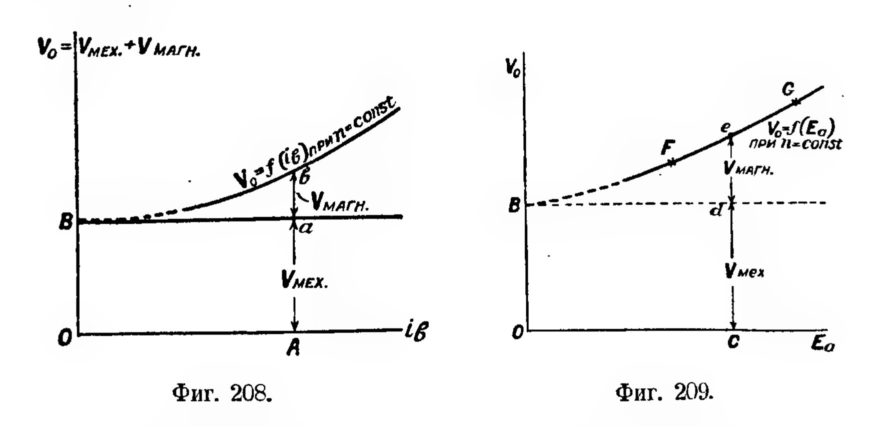
При определении отдельных и суммарных потерь выгодно выбирать мощность вспомогательного двигателя только немного больше суммарных потерь в испытуемой машине, так как это увеличивает точность определения потерь и коэффициента полезного действия. Причина этого лежит в том, что величина коэффициента полезного действия мало меняется при полных нагрузках и, наоборот, резко меняется при малых нагрузках. Поэтому при слабых нагрузках вспомогательного двигателя легко могут произойти значительные ошибки из-за неточного подбора коэффициента полезного действия вспомогательного двигателя ($\eta_{всп}$).

Схемы соединения всех машин здесь нормальные, уже приводившиеся нами ранее.

16. Экспериментальное разделение потерь по методу Dettmar'a.

Разделение механических от магнитных потерь, известных нам в сумме, например из опыта холостого хода, основано на следующих соображениях. Если известно изменение потерь холостого хода ($V_o = V_{мех} + V_{магн}$) при постоянном числе оборотов машины ($n = const$) в зависимости от изменения тока возбуждения, то, очевидно, при токе возбуждения, равном нулю ($i_в = 0$), эти потери представят собой только механические потери, так как при отсутствии возбуждения магнитную индукцию в машине (пренебрегая влиянием остаточного магнетизма) можно считать равной нулю, следовательно, и магнитные потери также можно считать равными нулю. Если представить изменение потерь холостого хода в зависимости от тока возбуждения при постоянном числе оборотов в виде кривой (фиг. 208), то кривая пересечет ось ординат в точке B, представляющей величину механических потерь в машине при данном числе оборотов. Для других токов возбуждения, но при том же числе оборотов, механические потери останутся постоянными. Поэтому для какого-нибудь тока возбуждения, вычитая из общих потерь холостого хода (V_o) найденные маханические потери ($V_{мех}$), мы получим магнитные потери ($V_{магн} = V_o - V_{мех}$)

На нашей фигуре (208) при токе возбуждения OA ордината Ab представляет суммарные потери холостого хода, отрезок ее Aa, равный OB, — механические потери и отрезок ab — магнитные потери. Конечно при экспериментальном определении кривой $V_0 = f(i_в)$ при $n = const$ мы, понижая ток возбуждения, не сможем дойти до возбуждения, равного нулю, так как еще до этого момента машина, работающая двигателем в холостую, остановится (вследствие уменьшения вращающего момента двигателя с уменьшением тока возбуждения). Таким образом приходится итти вниз с уменьшением числа оборотов и затем продолжить эту кривую ($V_0 = f(i_в)$ при $n = const$) до пересе-



Фиг. 208.

Фиг. 209.

чения с осью ординат на-глаз. Для поддержания постоянного числа оборотов при уменьшении тока возбуждения приходится одновременно понижать и подводимое к зажимам якоря машины напряжение при помощи реостата, последовательно включенного с пусковым реостатом и якорем. Схема соединений показана на фиг. 205 при описании метода холостого хода.

Так как продолжение кривой $V_0 = f(i_в)$ на-глаз за опытную часть кривой является слишком неточным, то обычно на чертеже наносят не эту кривую, а другую, именно $V_0 = f(E_a)$ при $n = const$ (см. фиг. 209), где E_a есть обратная эл.-дв. сила двигателя ($E_a = E_k - I_a R_a$), и проверяют точку пересечения этой кривой с осью ординат еще аналитически. Действительно, при постоянном числе оборотов (но переменном токе возбуждения) механические потери будут постоянными ($V_{мех} = const$), магнитные же потери будут меняться в зависимости от изменения магнитной ин-

дукции, при чем зависимость магнитных потерь от магнитной индукции, как мы знаем, может быть принята квадратичной ($V_{магн} = C'_м \cdot B^2$). Так как обратная эл.-дв. сила при постоянном числе оборотов является прямо пропорциональной магнитной индукции, то вместо магнитной индукции мы можем считать магнитные потери пропорциональными квадрату эл.-дв. силы ($V_{магн} = C_м \cdot E_a^2$). Таким образом потери холостого хода для постоянного числа оборотов могут быть представлены в следующем виде:

$$V_o = V_{мех} + C \cdot E_a^2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad (423)$$

Это и есть уравнение кривой $V_o = f(E_a)$ при $n = const$, показанной на фиг. 209.

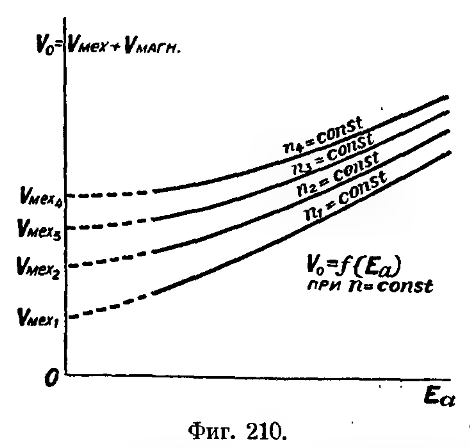
Взяв какие-нибудь две точки на кривой (фиг. 209), например F и G, отмечаем значения V_{o_F} и V_{o_G} и E_{o_F} и E_{o_G} для этих точек. Тогда мы можем написать два уравнения с двумя неизвестными:

$$\left.\begin{aligned} V_{o_F} &= V_{мех} + C \cdot E_{a_F}^2 \\ V_{o_G} &= V_{мех} + C \cdot E_{a_G}^2 \end{aligned}\right\} \quad \ldots \ldots \quad (424)$$

Решая эти уравнения относительно $V_{мех}$ и исключая постоянную C, найдем величину механических потерь при данном числе оборотов $n = const$.

$$V_{мех} = \frac{E_{a_F}^2 V_{o_G} - E_{o_G}^2 V_{o_F}}{E_{a_F}^2 - E_{a_G}^2} \quad \ldots \ldots \quad (425)$$

Величина $V_{мех}$ определит положение точки B пересечении нашей кривой с осью ординат. Величину $V_{мех}$ можно проверить еще раз для какой-нибудь другой пары точек кривой $V_o = f(E_a)$ при $n = const$.

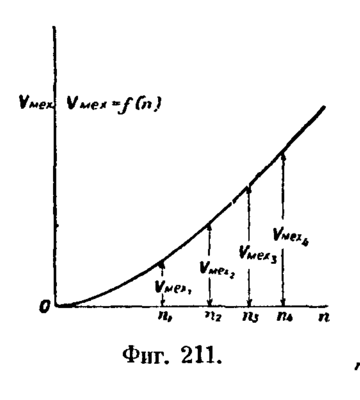


Фиг. 210.

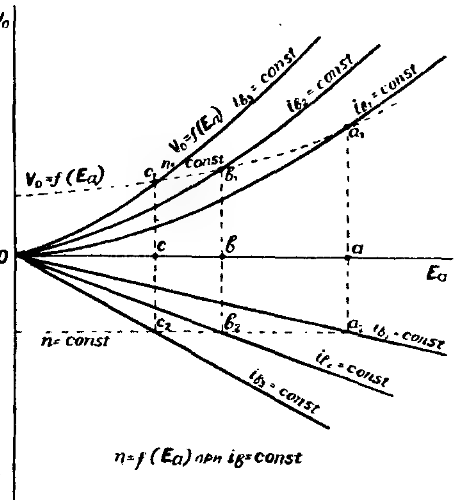
Опыт холостого хода проделывают для ряда чисел оборотов, при чем для каждого числа оборотов снимают свою кривую $V_o = f(E_a)$. Все эти кривые наносят на чертеже (фиг. 210), продолжают их до пересечения с осью ординат, проверяя каждый раз точки пересечения и аналитически. Пере-

сечения этих кривых дадут нам величины механических потерь для определенных чисел оборотов. Эти потери наносим в виде кривой в зависимости от числа оборотов (фиг. 211).

В силу того, что при снятии кривых $V_o = f(E_a)$, при $n = const$, приходится для поддержания постоянным числа оборотов регулировать одновременно и ток возбуждения и подводимое к зажимам якоря напряжение, непосредственное получение этих кривых представляется иногда затруднительным. В этом случае вместо кривых $V_o = f(E_a)$, при $n = const$, снимают опытным путем кривые $V_o = f(E_a)$, при $i_в = const$, которые и наносят на чертеже (см. фиг. 212). Эти кривые снимать уже легче, так как для снятия их приходится только понижать число оборотов при помощи одного последовательного реостата в цепи якоря. На том же чертеже вниз откладываем на основании данных, полученных из тех же опытов, зависимости $n = f(E_a)$, при $i_в = const$. Эти зависимости, очевидно, представляют собой прямые линии. Пользуясь этими вспомогательными прямыми, можно легко перейти от кривых $V_o = f(E_a)$, при $i_в = const$, к кривым $V_o = f(E_a)$, при $n = const$, т.-е. кривым фиг. 210, что нам и требуется.



Фиг. 211.

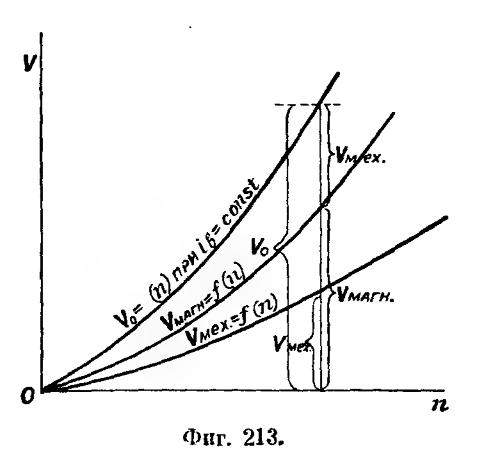


Фиг. 212.

Поступаем следующим образом. Для некоторого числа оборотов n проводим (в нижней части фиг. 212) горизонталь, пересекающую линии $n = f(E_a)$ в точках a_2, b_2, c_2. Через эти точки проводим вертикали, пересекающие ось абсцисс в точках a, b, c, и кривые $V_o = f(E_a)$, при $i_в = const$, в точках a_1, b_1, c_1. Первые

точки (a, b, c) дают эл.-дв. силы, соответствующие токам возбуждения ($i_{в1}$, $i_{в2}$, $i_{в3}$) при постоянном числе оборотов n. Последние точки (a_1, b_1, c_1) определяют потери холостого хода, соответствующие найденным токам возбуждения и эл.-дв. силам (Oa, Ob, Oc) при постоянном числе оборотов $n = const$. Таким образом по точкам определятся искомые кривые $V_o = f(E_a)$ при $n = const$. Проведя горизонтальную прямую для некоторого другого числа оборотов n, мы нашли бы вторую кривую $V_o = f(E_a)$ для этого числа оборотов ($n_1 = const$). Имея кривые $V_o = f(E_a)$ при $n = const$, найдем механические потери $V_{мех} = f(n)$ так, как было указано выше (см. фиг. 211).

Для того чтобы найти магнитные потери, определяем сначала методом холостого хода кривую $V_o = f(n)$ при $i_в = const$, при чем возбуждение выбираем такое, при котором мы хотим найти магнитные потери в нашей машине. Эту кривую наносим на чертеже (фиг. 213). На том же чертеже наносим найденную нами кривую механических потерь $V_{мех} = f(n)$. Вычитая вторую кривую из первой, найдем магнитные потери нашей машины ($V_{магн}$).



Фиг. 213.

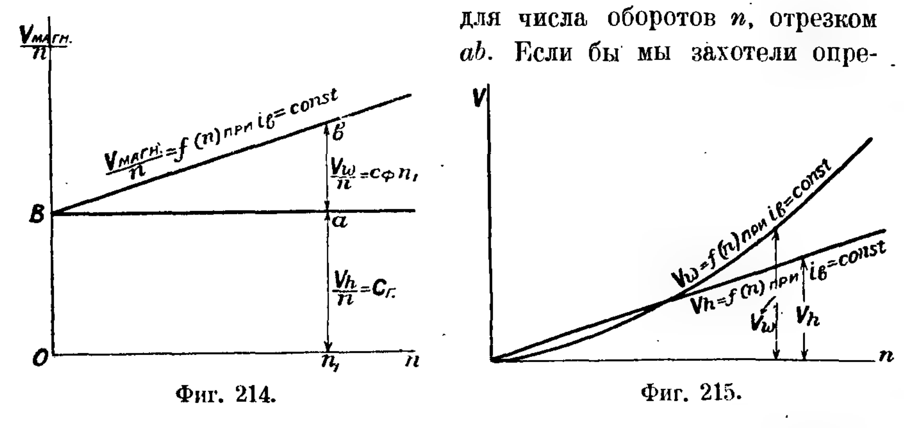
Эти потери можно также разделить на потери на гистерезис и потери на токи Фуко. Разделение этих потерь основано на том, что потери на гистерезис при постоянной индукции пропорциональны первой степени числа оборотов ($V_h = C_г \cdot n$), а потери на токи Фуко пропорциональны второй степени числа оборотов ($V_w = C_ф \cdot n^2$). Таким образом магнитные потери можно представить в виде суммы:

$$V_{магн} = C_г \cdot n + C_ф \cdot n^2. \qquad (426)$$

Если мы разделим левую и правую части уравнения (426) на число оборотов n, то получим:

$$\frac{V_{магн}}{n} = C + C_ф \cdot n, \qquad (427)$$

т.-е. что магнитные потери, отнесенные к одному обороту машины, представляются в виде прямолинейной зависимости их от числа оборотов. Эта прямая $\left[\frac{V_{магн}}{n}=f(n)\right]$ (см. фиг. 214) отсекает на оси ординат отрезок OB равный $C_г$ и представляющий собой потери на гистерезис, отнесенные к одному обороту машины при данном токе возбуждения. Эти потери $\left(\frac{V_h}{n}\right)$ являются постоянными при неизменном токе возбуждения. Вычитая из прямой $\frac{V_{магн}}{n}=f(n)$ постоянные потери на гистерезис $\frac{V_h}{n}$, получим переменную величину потерь на токи Фуко, представляемую, например для числа оборотов n, отрезком ab. Если бы мы захотели определить полные потери на гистерезис и на токи Фуко, мы должны были бы найденные нами величины потерь на один оборот каждый раз помножить на соответствующее число оборотов. Например для числа оборотов n_1 потери на гистерезис получатся от перемножения величины $\overline{n_1 a}$ на число оборотов n_1, а для получения потерь на токи Фуко мы должны помножить величину $\overline{ab}$ на ту же величину числа оборотов машины n_1.



Фиг. 214. Фиг. 215.

Значения этих потерь нанесены на фиг. 215 в функции от числа оборотов.

Таким образом мы определили все потери машины в отдельности.

17. Разделение потерь по методу самоторможения или выбега.

Наиболее точным с теоретической стороны является разделение потерь холостого хода по методу самоторможения. Сущность этого метода основана на следующем. При вращении машины

с угловой скоростью $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ вращающиеся массы ее обладают некоторой потенциальной энергией вращения

$$A = \frac{\omega^2}{2} \cdot J = \frac{1}{2} \frac{\pi^2 \cdot n^2}{30^2} \cdot J, \quad \ldots \ldots (428)$$

где J — есть момент инерции вращающихся масс машины.

Если, разогнав машину до определенного числа оборотов, прервать вращающее усилие, то по инерции машина будет продолжать свое вращение.

Если бы в машине не было никаких потерь, то вращение машины продолжалось бы с постоянным числом оборотов бесконечно долго. Так как на самом деле в машине существуют потери, то число оборотов ее будет постепенно уменьшаться, и, наконец, машина остановится. Поддержание вращения машины в этом случае будет происходить за счет потенциальной энергии вращающихся масс (A). Когда вся эта энергия будет израсходована, машина остановится.

На основании законов механики можно сказать, что уменьшение потенциальной энергии вращения за единицу времени равняется работе трения плюс другие потери в машине за тот же период времени, т.-е.

$$V_o = -\frac{dA}{dt} = -J\left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \cdot n \frac{dn}{dt} \text{ кг-м/сек}, \quad \ldots . (429)$$

или в ваттах

$$V_o = -9{,}81 \cdot J \cdot \left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \cdot n \frac{dn}{dt} \text{ ватт.} \quad \ldots \ldots (430)$$

Обозначив постоянную часть этого выражения через

$$C = 9{,}81 \cdot J \cdot \left(\frac{\pi}{30}\right)^2, \quad \ldots \ldots \ldots (431)$$

получим:

$$V_o = -C \cdot n \cdot \frac{dn}{dt} \text{ ватт.} \quad \ldots \ldots \ldots (432)$$

Геометрически выражение вида $n\frac{dn}{dt}$ представляет собой поднормаль некоторой кривой $n = f(t)$.

Таким образом, найдя опытным путем зависимость изменения числа оборотов от времени для определенных условий вращения

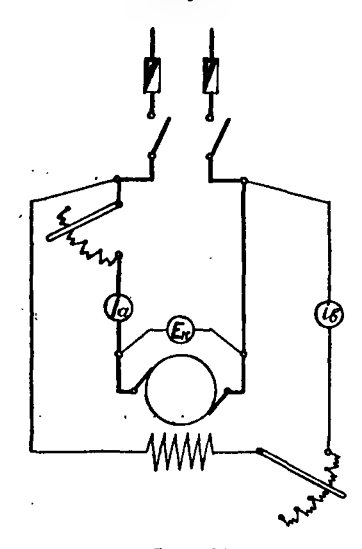
двигателя и нанеся эту зависимость в виде кривой $n=f(t)$, мы можем найти по поднормали величину потерь машины при этих условиях, если сумеем определить величину постоянной C. Определить величину этой постоянной аналитически (формула 431) представляется затруднительным в силу трудности вычисления момента инерции вращающихся масс машины при сложной форме якоря и коллектора. Обычно, поэтому, величину C определяют опытным путем, пользуясь опытом холостого хода.

Для разделения механических и магнитных потерь снимают две кривых выбега $n=f(t)$, каждый раз разгоняя машину двигателем вхолостую до числа оборотов несколько большего, чем нормальное. Первую кривую снимают, заставляя машину тормозиться без нагрузки и без возбуждения. Для этого после разгона машины одновременно вырубают ток как из цепи якоря, так и из обмотки возбуждения при помощи главных рубильников. В этом случае при торможении машина имеет только механические потери и

$$V_o = V_{мех} = -C \cdot n\frac{dn}{dt} \qquad (433)$$

Вторую кривую снимают также без нагрузки, но при включенном токе возбуждения $i_в = const$, при чем ток возбуждения устанавливается такой, при каком мы хотим найти магнитные потери машины. В этом случае машина тормозится как вследствие механических, так и вследствие магнитных потерь. Здесь

$$V_o = V_{мех} + V_{магн} = -Cn'\frac{dn'}{dt} \qquad (434)$$

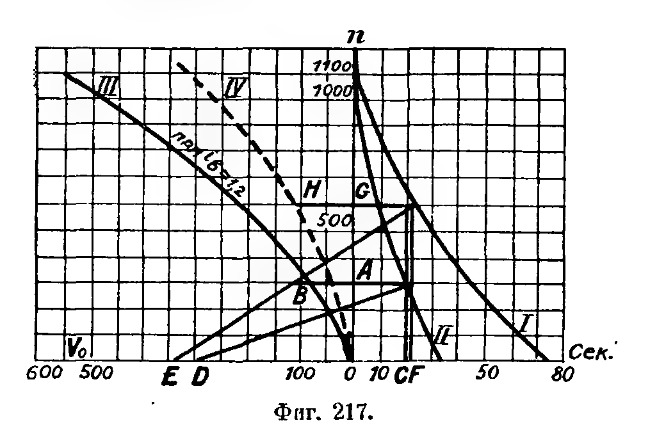


Фиг. 216.

Схема соединений машины двигателем в этом опыте нормальная, при чем только должна быть предвидена возможность при выключении пускового реостата оставления под током цепи возбуждения (см. схему фиг. 216). Время отмечают по секундомеру или секундной стрелке часов, число оборотов — по тахометру или вольтметру, приключенному к зажимам якоря, так

как при постоянном токе возбуждения эл.-дв. сила, показываемая вольтметром, прямо пропорциональна числу оборотов машины. Конечно вольтметр должен быть предварительно проградуирован для данного тока возбуждения при холостом ходе на обороты (найдена прямая $E_a = f(n)$ при $i_в = const$).

Полученные кривые $[(n = f(t)]$ наносим на чертеже (см. фиг. 217). Очевидно, кривая выбега для невозбужденной машины (кривая I) будет более пологая; наоборот, при возбуждении (кривая II)—более крутая. Постоянную C, одинаковую для обеих кривых, определяем следующим образом. Запускаем машину двигателем вхолостую при том же возбуждении $i_в = const$, при котором мы снимали



Фиг. 217.

кривую выбега (кривая II), и находим описанным выше методом холостого хода потери V_0 для какого-нибудь определенного числа оборотов n_1.

С другой стороны, эти же потери мы найдем по кривой II, взяв поднормаль $\left(CD = n_1 \frac{dn_1}{dt}\right)$ для того же числа оборотов n_1 (равного, например, $n_1 = OA$) и найдя выражение $C \cdot n_1 \cdot \frac{dn_1}{dt}$. Отсюда можно написать равенство:

$$V_{o_1} = C \cdot n_1 \frac{dn_1}{dt} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (435)$$

(Знак — перед $Cn_1 \frac{dn_1}{dt}$ не пишем, так как он в выражении (432) указывал лишь на уменьшение энергии живой силы и для абсолютной величины потерь не имеет значения.)

В этом равенстве только одна неизвестная—это C, которую и находим:

$$C=\frac{V_{o1}}{n_1\frac{dn_1}{dt}}\,. \qquad (436)$$

Зная постоянную C, по кривым (I и II) найдем механические $V_{мех}$ (по кривой I) и суммарные $V_{мех}+V_{магн}$ (по кривой II) потери, помножая поднормали (например CD для кривой II для числа оборотов $OA=n_1$ или поднормаль EF для кривой I при числе оборотов OG) на эту постоянную. На фиг. 217 определенные таким образом потери нанесены в виде кривых (кривые III и IV) в зависимости от числа оборотов. Кривая III дает сумму механических и магнитных потерь, кривая же IV — только механические потери. Вычитая из кривой III кривую IV, получим одни магнитные потери.

При отсчете величины поднормалей соответствующие отрезки (CD, EF и т. д.) измеряем в масштабе абсцисс, т.-е. секундами. Для перехода к потерям эти величины в секундах надо помножить на квадрат отношения масштаба ординат к масштабу абсцисс, т.-е. на

$$\left(\frac{\text{масштаб ординат}}{\text{масштаб абсцисс}}\right)^2.$$

Действительно, отрезки CD и EF представляют собой произведение числа оборотов (n) на изменения их в элемент времени $\left(\frac{dn}{dt}\right)$; следовательно

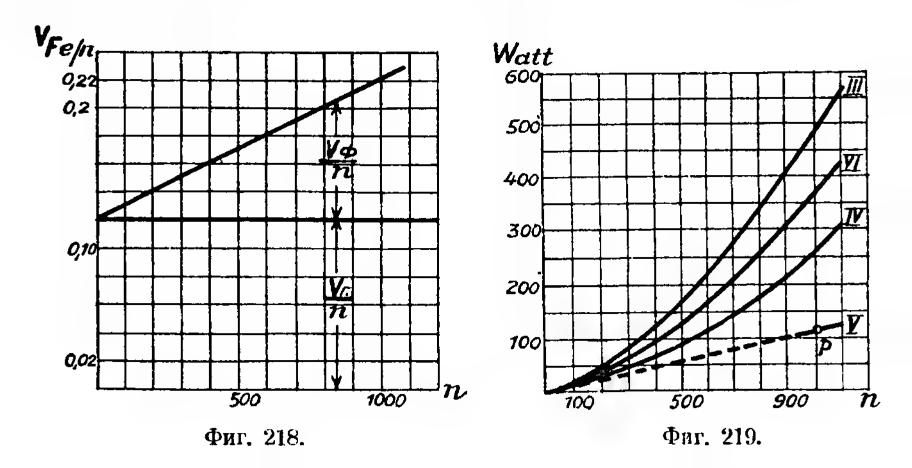
$$n\frac{dn}{dt}=\frac{CD\text{ в масштабе абсцисс}}{\text{масштаб абсцисс}}\times\text{масштаб числа оборотов}\times$$
$$\times\frac{\text{масштаб числа оборотов}}{\text{масштаб абсцисс}}=CD\,(\text{в масштабе абсцисс})\times$$
$$\times\left(\frac{\text{масштаб ординат}}{\text{масштаб абсцисс}}\right)^2. \qquad (437)$$

Таким образом, если масштаб ординат на фиг. 217 взят так, что 1 *мм* = 29 оборотам в минуту и масштаб абсцисс 1 *мм* = 2,9 *сек*, то поднормали (CD, EF), измеренные в секундах, мы должны множить на величину

$$\left(\frac{\text{масштаб ординат}}{\text{масштаб абсцисс}}\right)^2=\left(\frac{29}{2{,}9}\right)^2=100.$$

Для разделения магнитных потерь на потери на гистерезис и на потери на токи Фуко поступаем так же, как поступали при опи-

сании разделения потерь способом *Dettmar'a.* Найденные суммарные магнитные потери (кривая III на фиг. 217) относим к одному обороту, т.-е. находим кривую $\frac{V_{магн}}{n}=f(n)$, которую и наносим на новом чертеже (фиг. 218). Эта кривая, как мы указывали, представляет собою прямую. Пересечение ее с осью ординат определяет величину потерь на гистерезис (на один оборот). Эта величина для всех чисел оборотов остается постоянной. Величина потерь на токи Фуко (на один оборот) определится для какого-нибудь числа оборотов как разность ординат кри-



Фиг. 218.

Фиг. 219.

вой $\frac{V_{магн}}{n}=f(n)$ и отрезка, представляющего постоянные потери на гистерезис на один оборот. Полные потери на гистерезис и на токи Фуко определятся как произведение найденных нами величин (потерь на один оборот) на соответствующие каждой точке числа оборотов. Для данного примера эти потери нанесены в виде кривых на фиг. 219. Здесь кривая III (взята из фиг. 217) представляет собой суммарные потери холостого хода в зависимости от числа оборотов. Кривая IV (взята из той же фигуры) и представляет собой механические потери. Кривая (прямая) V — представляет потери на гистерезис ($V_h = C_h \cdot n$). Прибавив к кривой IV (механических) потерь кривую V (потери на гистерезис), получим кривую VI. Отрезки ординат между кривыми III и IV дают величины суммарных магнитных потерь. Эти отрезки кривой VI делятся на потери на токи Фуко (между кривыми III и VI) и на гистерезис (между кривыми VI и IV).

18. Более точный метод установления равенства магнитных индукций при холостом ходе и нагрузке в опыте холостого хода.

Выше мы говорили, что при определении механических и магнитных потерь опытом холостого хода для того, чтобы магнитные и механические потери при холостом ходе были одинаковыми с этими же потерями при нагрузке, необходимо в опыте холостого хода установить то же число оборотов и ту же магнитную индукцию, какие были при нагрузке. При установлении равенства магнитной индукции мы, пренебрегая влиянием реакции якоря, считали, что индукции будут одинаковыми, если при холостом ходе взять ток возбуждения, равный току возбуждения при нагрузке.

Если желательно получить бо́льшую точность в этом отношении, то необходимо для установления равенства магнитных индукций исходить не из одинаковых токов возбуждения, а из равных эл.-дв. сил при работе машины в том и другом случае.

Ранее мы видели, что при определенной якорной обмотке (определенном числе проводников и определенной длине якоря) и определенном числе оборов эл.-дв. сила машины (в двигателе — обратная эл.-дв. сила) прямо пропорциональна магнитной индукции машины. Отсюда, обратно, если при одной и той же скорости машины при холостом ходе и нагрузке установить равенство эл.-дв. сил в обоих случаях, то можно утверждать, что средние магнитные индукции их одинаковы, а вместе с тем будут одинаковыми и магнитные потери.

В генераторе эл.-дв. сила равняется:

$$E_{a\,ген} = E_{k\,ген} + I_{a\,ген} R_a, \quad \ldots \ldots \quad (438)$$

где $E_{k\,ген}$ — напряжение на зажимах самого якоря машины,

R_a — сопротивление якоря, включая и сопротивление контакта щеток.

В двигателе обратная эл.-дв. сила равна:

$$E_{a\,дв} = E_{k\,дв} - I_{a\,дв} R_a; \quad \ldots \ldots \quad (439)$$

E_k и R_a означают те же величины.

Таким образом при испытании генератора необходимо установить:

$$E_{a\,ген} = E_{a_0}; \; E_{k\,ген} + I_{a\,ген} R_a = E_{k_0} - I_0 R_a. \quad \ldots \quad (440)$$

При испытании двигателя должно быть:

$$E_{a\,дв\,нагр} = E_{a_0\,дв}\,;\ E_{k\,дв} - I_{a\,дв}R_a = E_{к_0} - I_0R_a, \quad . \quad . \ (441)$$

при чем токи возбуждения при холостом ходе и при нагрузке будут уже несколько отличаться друг от друга. Таким образом, если бы мы при испытании некоторого генератора в 3 kW захотели определить потери холостого хода для нагрузки этого генератора в $I_a = 10$ ампер при $E_k = 100$ вольт, $n = 2\,000$ оборотов в минуту и $i_в = 0{,}62$ ампера, $R = 0{,}4\,\Omega$, мы должны были бы запустить этот генератор вхолостую при 2 000 оборотов с таким возбуждением, чтобы

$$E_{a_0} = E_{к_0} - I_0E_a = E_{k\,ген} + I_{a\,ген}R_a = 100 + 10\cdot 0{,}4 = 104 \text{ вольта.}$$

Регулируя возбуждение и поддерживая постоянное число оборотов $n_0 = 2\,000$, мы получим необходимую эл.-дв. силу $E_{a_0} = 104$ вольт при следующих данных холостого хода:
$E_{к_0} = 105{,}5$ вольта, $I_a = 3{,}7$ ампера, $i_{в_0} = 0{,}74$ ампер, $n_0 = 2000$.

При этих условиях получается действительно:

$$E_{a_0} = E_{к_0} - I_0R_a = 105{,}5 - 3{,}7\cdot 0{,}4 = 104 \text{ вольта} = E_{a\,ген},$$

что и требуется для равенства магнитных индукций.

Потери холостого хода при этом будут равны:

$$V_0 = E_{к0}I_0 - I_0^2R_a = 105{,}5\cdot 3{,}7 - 3{,}7^2\cdot 0{,}4 = 386 \text{ ватт.}$$

Если бы мы определяли потери приближенно и опыт холостого хода в этом случае вели при одинаковом токе возбуждения, то для нагрузки генератора в 10 ампер мы получили бы следующие данные холостого хода:

$$E'_{к_0} = 102 \text{ вольта},\ I'_{к_0} = 3{,}4 \text{ ампера},\ i_{в_0} = 0{,}62,\ n_0 = 2000.$$

Отсюда потери холостого хода определятся

$$V'_0 = E'_{к_0}I'_0 - I_0'^2R_a = 102\cdot 3{,}4 - 3{,}4^2\cdot 0{,}4 = 342 \text{ ватта.}$$

Таким образом ошибка в определении потерь холостого хода при приближенном методе получается заметная:

$$V_0 - V'_0 = 386 - 342 = 44 \text{ ватта.}$$

ГЛАВА ВОСЬМАЯ.

НАГРЕВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА.

1. Допустимые пределы нагревания электрических машин.

Вся энергия, которая затрачивается в машине постоянного тока на потери, переходит в тепло вне зависимости от того, на какие потери она тратится. Вследствие этого происходит повышение температуры машины над температурой окружающего воздуха. Получающаяся разница между температурой машины и окружающего воздуха обусловливает отдачу тепла в окружающую среду.

Произведенная в машине теплота пропорциональна потерям. Отдача теплоты в атмосферу приблизительно пропорциональна повышению температуры и лучеиспускающей поверхности машины.

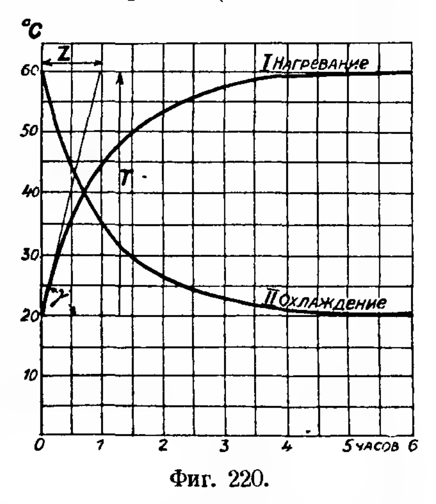
При пуске машины в работу температура ее возрастает сначала быстро, так как в первое время почти нет отдачи теплоты в окружающий воздух и все произведенное тепло идет на нагревание самой машины. При возрастании температуры увеличивается передача теплоты в окружающую атмосферу, и возрастание температуры становится медленнее. Наконец, по истечении достаточно продолжительного времени дальнейший рост нагрева прекращается, и в машине устанавливается некоторая постоянная температура, при которой отдача теплоты в окружающую среду как-раз будет равна теплоте, произведенной в машине. Охлаждение машины идет также сначала быстро, а затем все медленяее и медленнее. Процесс нагревания и охлаждения машины наглядно иллюстрируется кривыми фиг. 220.

Чрезвычайно существенно, чтобы максимально устанавливающаяся температура машины и ее отдельных частей не пре-

восходила определенной величины, так как иначе машина быстро будет попорчена. Так известно, что хлопчатобумажная изоляция уже при температуре свыше 90° C начинает обугливаться. В силу этих обстоятельств на Всероссийских электротехнических съездах были установлены нормы, свыше которых не должно допускаться нагревание отдельных частей электрических машин, чтобы изоляция машины не была попорчена. Аналогичные нормы имеются у Союза германских электротехников, Союза американских инженеров-электриков и др.

В приведенной ниже таблице указаны немецкие нормы для нагревания машин, несколько более строгие (более новые по составлению), чем русские. В этих нормах, как равным образом и в русских нормах, повышение температуры считается свыше температуры окружающего воздуха, которая принимается равной максимально 35° C.

В соседней графе указаны максимально допустимые средние значения температур нагретых частей машины. Нормы, как мы видим, зависят от сорта употребленной для данной обмотки изоляции.



Фиг. 220.

Если изоляция многослойная и разных сортов, то допустимое нагревание берут по более слабой в этом отношении изоляции (см. табл. стр. 284).

В русских нормах для вращающихся обмоток.

При изоляции из хлопчатой бумаги повышение температуры допускается в 50° C.

При изоляции из бумаги в 60° C.

Для неподвижных обмоток также допущено увеличение нормы на 10° C.

В остальном нормы такие же, как и немецкие.

Для трамвайных и вообще тяговых двигателей при испытании часовой непрерывной нагрузкой на испытательной станции допускается перегрев свыше вышеуказанных норм еще на 20° C, кроме подшипников.

ТАБЛИЦА 7.

	1 Наивысшее допустимое повышение температуры	2 Наивысшая допустимая температура
а) **У обмоток, и именно у неподвижных обмоток магнитов постоянного тока** при изолировании непропитанной хлопчатой бумагой	50° C	85° C
при изоляции из пропитанной хлопчатой бумаги, из бумаги	60°	95°
при изоляции эмалью, асбестом, слюдой и их препаратами	80°	115°
У вращающихся обмоток при изоляции из непропитанной хлопчатой бумаги	40°	75°
при изоляции, пропитанной хлопчатой бумагой	50°	85°
при хлопчатой бумаге и заполнении впадин массой, равным образом при бумаге		
при эмали, асбесте, слюде и их пре-	6[illegible]°	95°
паратах	80°	115°
б) На коллекторах машин свыше 10 вольт	55°	90°
до 10 вольт включительно	60°	95°
в) В подшипниках	45°	80°

Так как потери машины с увеличением нагрузки растут, а вместе с тем растет и нагревание, то хорошо построенная в отношении коммутации и в магнитных отношениях машина имеет предел мощности, определяемый именно этой величиной нагрева (величиной повышения температуры при максимальной нагрузке).

В силу этого чрезвычайно важно уметь заранее рассчитать величину повышения температуры отдельных частей машины. В общем, впрочем, в этом отношении не имеется точных расчетных формул и методов расчета, которые бы давали совершенно точные результаты, так как повышение температуры в очень сильной степени зависит от формы и конструкции машины.

Для отдельных типов машин удается опытным путем установить экспериментальные формулы, дающие довольно близкие к действительности результаты. Таким образом обычно и поступают в практике.

Повышение температуры, как мы говорили выше, определяется теплоотдачей машины в окружающую среду. Эта теплоотдача может происходить трояким способом:

а) непосредственной теплоотдачей благодаря теплопроводности окружающей среды. Эта теплопередача в эл. машинах происходит главным образом через фундамент и обычно численно очень мала,

б) через лучеиспускание и

в) через конвекцию воздухом.

Законов теплоотдачи мы рассматривать здесь не будем, так как они все же нам не дают, как мы сказали, достаточных оснований для точных расчетов, и рассмотрим лишь те эмпирические формулы, которые дают возможность приближенно определять повышения температуры в отдельных частях машины и которыми поэтому пользуется практика.

Здесь только сделаем одно замечание относительно способов опытного определения повышения температуры в отдельных частях машины. При этих определениях пользуются или непосредственным наблюдением температуры нагретой части или обмотки машины при помощи термометра, приложенного к нагретому месту машины, или же повышение температуры находят по изменению сопротивления обмоток, нагрев которых мы желаем определить. Нагрев неподвижных обмоток (шунтовой, последовательной, дополнительных полюсов) определяют обычно по изменению сопротивления обмоток, что требуется и по нормам. Повышение же температуры обмотки якоря, коллектора и т. д. определяется непосредственно прикладыванием термометра. Для лучшего контакта (машина на время отсчета останавливается) конец термометра с ртутью обертывается станиолью, и сверху шарик термометра, приложенный к нагретому месту, прикрывается ватой или сухими концами (дурно проводящим тепло материалом). Измерение температуры обмотки магнитов по сопротивлению дает более точные результаты, ибо нагревание всей толщи обмотки магнитов происходит неравномерно,— наиболее нагретые части обмотки находятся во внутренней части обмотки и недоступны для непосред-

ственного измерения термометром. Верхние же витки магнитной обмотки являются более холодными.

Опыты показывают, что повышение температуры, измеренное по увеличению сопротивления обмотки, дает величину нагревания на 40—60% бо́льшую, чем при измерении термометром, так что отношение:

$$\frac{\text{среднее повышение температуры по сопротивлению}}{\text{среднее повышение температуры по термометру}} = \text{от } 1{,}4 \text{ до } 1{,}6,$$

а в отдельных случаях доходит до 2,0. . . . . (442)

Измерение же нагревания обмотки якоря и коллектора происходит обычно при помощи термометра, так как здесь наибольшие потери происходят главным образом в верхнем слое цилиндра якоря: в самой якорной обмотке и в железе зубцов, а также и по верхней поверхности коллектора.

Надо, впрочем, отметить, что таким образом определенные повышения температур будут при обоих способах давать только средние повышения температуры обмоток и частей машины, в отдельных же местах будут местные максимальные нагревы бо́льшие, чем средние, на 10°—15° С и выше, — эти нагревы по существу и определяют опасные места перегрева и порчи изоляции машины.

2. Повышение температуры обмотки возбуждения.

Повышение температуры обмотки возбуждения определяют по формуле:

$$T_m = \frac{C_m}{a_m} \text{ градусов Цельсия}, \quad . \ . \ . \ . \ . \ (443)$$

где C_m есть некоторое эмпирическое число, а a_m — есть удельная поверхность охлаждения магнитных катушек, т.-е. охлаждающая поверхность в $см^2$ на 1 ватт потерь, т.-е.

$$a_m = \frac{\text{поверхность охлаждения в } см^2}{\text{ватт потерь}} = \frac{A_m}{V_h + V_n}, \quad . \ . \ . \ (444)$$

где A_m — есть поверхность охлаждения всех катушек.

Если магнитные катушки длинны, то в качестве охлаждающей поверхности, считают по фиг. 221, только боковую и нижнее основание. При более толстых и коротких катушках, по фиг. 222, считают охлаждающей поверхностью боковую и два основания катушек.

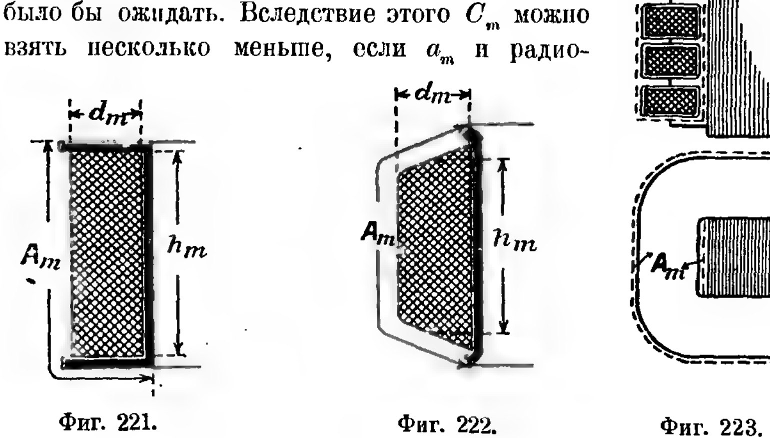
Что касается толщины катушек, то при более длинных и прямоугольных катушках здесь редко идут выше 4—5 *см*.

Коэффициент C_m, учитывающий теплоотдачу, зависит от изоляции магнитной катушки, от конструкции машины, от величины a_m, от нагрева якоря. Величину этого коэффициента принимают:

для совершенно открытых машин C_m=450—550,
„ машин с подшипниковыми щитами C_m=550—650,
„ полузакрытых машин C_m=650—750;

для совершенно закрытых машин C_m может доходить до 1300 и выше.

Чем лучше вентилируется якорь, тем больше теплоотдача якоря в окружающую среду, тем больше нужно выбирать C_m (тем хуже для охлаждения магнитов). Чем больше T_m, тем больше нагрев ярма и, благодаря теплоотдаче наружной поверхности ярма, стационарная температура T_m будет меньше, чем можно было бы ожидать. Вследствие этого C_m можно взять несколько меньше, если a_m и радио-

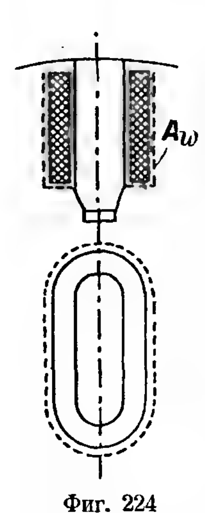


Фиг. 221. Фиг. 222. Фиг. 223.

нальная высота ярма малы.

Для получения более надежных результатов необходимо на заводе при постройке машин собирать опытные величины повышения температуры и систематизировать их в зависимости от видоизменений конструкции. Пользуясь этим материалом, можно путем последовательных приближений получить возможно лучшие результаты.

Для лучшего охлаждения иногда подраздяляют обмотку магнитов на отдельные катушки, как это показано на фиг. 223.



Фиг. 224

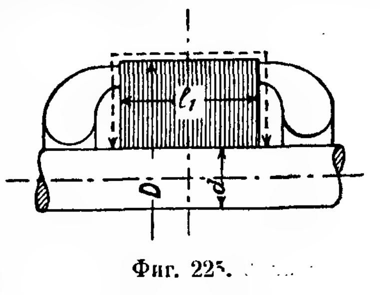
при чем воздух может вентилировать катушки, проходя также в промежутки, оставленные между катушками и сердечником магнитов. Охлаждающая поверхность A_m, которая в этом случае принимается в расчет при определении повышения температуры, показана пунктирными линиями на фиг. 223.

Расчет нагревания обмотки дополнительных полюсов (см. фиг. 224) производится совершенно так же, как и обмотки главных полюсов, при чем, так как слой обмотки дополнительных полюсов обычно значительно тоньше слоя обмотки главных полюсов и менее изолирован, то для обмотки дополнительных полюсов коэффициент C_w для вычисления температуры этих полюсов получается в два раза меньший, чем для главных полюсов.

3. Нагревание якоря.

Как мы сказали, в якоре наибольшее нагревание получается в верхнем слое якорной поверхности, где между зубцами уложены проводники обмотки.

Согласно нормам, испытание на нагрев производится у якоря при помощи термометра. Величина охлаждающей поверхности якоря в сильной степени зависит от формы обмотки, а также от числа вентиляционных каналов. Весьма благоприятно для охлаждения, если обмотка устроена так (в своих лобовых соединениях), что воздух может проходить между витками, как это бывает иногда при стержневой обмотке. На охлаждение якоря влияет также скорость, с которой вращается машина.



Фиг. 225.

a) При маленьких двухполюсных якорях с обмоткой, устроенной согласно фиг. 225, в качестве охлаждающей поверхности A_a принимается боковая поверхность цилиндра якоря $\pi D l$ и обе лобовые поверхности железа якоря, в сумме равные $\frac{\pi}{2}(D^2 - d^2)$. Таким образом

$$A_a = \pi D l_1 + \frac{\pi}{2}(D^2 - d^2). \quad \quad (445)$$

Через эти поверхности должна быть отведена теплота всех потерь в якоре $V_{ka} + V_{ei}$.

При этом потери в якоре необходимо брать равными $V_{ka} = I_a^2 R_a$, где R_a есть сопротивление только одной обмотки якоря (без сопротивления контакта щеток).

Таким образом при малых якорях удельная поверхность охлаждения якоря, приведенная к неподвижному состоянию, может быть принята равной:

$$a_a = \frac{\text{поверхность охлаждения в } cм^2}{\text{потери в ваттах}} \cdot (1+0,1 \cdot v)$$

$$= \frac{A_a}{V_{ka} + V_h + V_w} \cdot (1+0,1 \cdot v)$$

$$a_a = \frac{\pi D l_1 + \frac{\pi}{2}(D^2 - d^2)}{V_{ka} + V_h + V_w} \cdot (1+0,1 \cdot v) \quad . \; . \; . \quad (446)$$

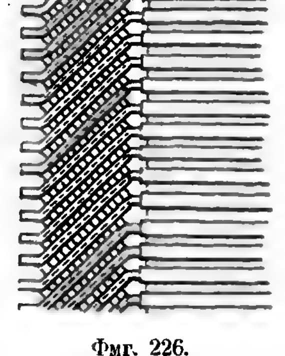
где v есть окружная скорость якоря в *м/сек*.

При полузакрытых типах с подшипниковыми щитами повышение температуры якоря равно:

$$T_a = \frac{\text{от } 450 \text{ до } 550}{a_a} \text{ градусов Цельсия} \quad . \; . \; . \; . \quad (447)$$

При совершенно открытых типах с отдельными подшипниками коэффициент C приблизительно на 30% меньше, т.-е. C = от 350 до 425.

Правильность учета влияния на нагрев якоря окружной скорости (см. ф-лу 446) подтверждается целым рядом конструкторов.



Фиг. 226.

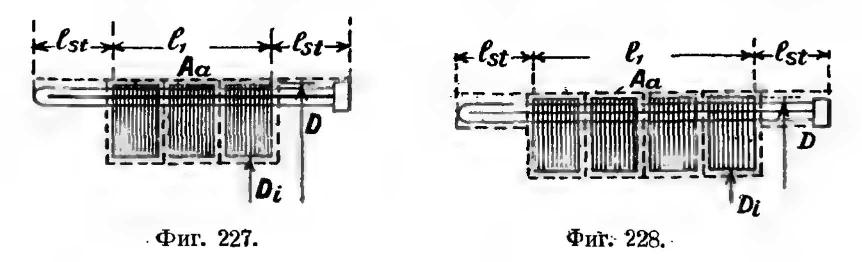
б) **При больших якорях с цилиндрической обмоткой** охлаждение улучшается, благодаря более открытому доступу воздуха к железу якоря, а также благодаря наличию вентиляционных каналов. Лобовые соединения располагаются у больших машин по цилиндрической поверхности в целях лучшего охлаждения и вентиляции. Наличие воздушных промежутков между сторонами секций обмотки (см. фиг. 226) также может

улучшить доступ воздуха к значительно большей поверхности лобовых соединений цилиндрической обмотки.

При якорях, имеющих диаметр до 40 *см*, в качестве охлаждающей поверхности принимают сумму поверхностей, отмеченных пунктирными линиями на фиг. 227, и удельная охлаждающая поверхности якоря будет в этом случае равна:

$$a_a = \frac{\pi D(l_1 + 2\,l_{st}) + \pi D_i\, l_1 + \frac{\pi}{4}(D^2 - D_i^2)(2 + \text{число возд. кан.})}{V_{ka} + V_{ei}} \cdot (1 + 0{,}1v) \quad (448)$$

Для якорей с диаметром больше 40 *см* в качестве охлаждающей поверхности берут поверхности, показанные пунктиром на фиг. 228.



Фиг. 227. Фиг. 228.

Удельная охлаждающая поверхность для этого случая может быть взята равной:

$$a_a = \frac{\pi D(l_1 + 4\,l_{st}) + \pi D_i\, l_1 + \frac{\pi}{4}(D^2 - D_i^2)(2 + \text{число возд. кан.})}{V_{ka} + V_{ei}} \cdot (1 + 0{,}1 \cdot v) \quad (449)$$

Коэффициент $(1 + 0{,}1 \cdot v)$ здесь также учитывает влияние скорости вращения якоря на его охлаждение.

Повышение температуры (измеренное термометром) должно равняться:

$$T_a = \frac{C_a}{a_a} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (450)$$

Коэффициент теплоотдачи C_a зависит от конструкции машины и особенно от охлаждения лобовых соединений, равным образом от вентиляции соединительных проводов между якорной обмоткой и коллектором. Для современных, хорошо вентилируемых, якорей можно принять:

$$C_a = \text{от } 450 \text{ до } 500.$$

Так как в большинстве современных машин имеется обычно довольно постоянное соотношение между потерями на нагревание якоря в части, проходящей по впадинам в железе якоря, и железными потерями в слое зубцов якоря, то для этой части (наиболее нагретой) могут быть также установлены некоторые предельные практические нормы потерь на единицу охлаждающей поверхности в этой части якоря, т. е. для величины

$$\frac{W_{kz}}{(1+0,1\cdot v)\cdot \pi D l_1}=\frac{N l_1 i_a^2}{(1+0,1\cdot v)\cdot \pi D l_1 q_a}=\frac{AS\cdot s_a}{1+0,1\cdot v}\quad . \quad (451)$$

Последняя величина не должна превосходить определенного значения, чтобы повышение температуры якоря не превзошло предписанных норм. Именно при современных, хорошо вентилируемых, машинах должно брать:

$$\frac{AS\cdot s_a}{1+0,1\cdot v}<500 \text{ до } 600\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ (452)$$

Этим соотношением можно пользоваться при предварительном выборе AS и s_a.

4. Нагревание коллектора.

На коллекторе получаются следующие потери:

в переходном слое $V_u = 2 I_a \Delta P \cdot f_u$ ватт

и на трение щеток $V_2 = 9{,}81 \cdot v_k \cdot F_b \cdot g\rho$ ватт . . . (453)

Здесь обозначают:

g — удельное давление щетки на коллектор в *кг/см²*,

ρ — коэффициент трения,

v_k — окружная скорость коллектора в *м/сек*,

F_b — площадь прилегания всех щеток,

при чем для медных щеток

$$g = \text{от } 0{,}10 \text{ до } 0{,}13 \text{ и } \rho = \text{от } 0{,}25 \text{ до } 0{,}3$$

и для угольных щеток

$$g = \text{от } 0{,}12 \text{ до } 0{,}15 \text{ и } \rho = \text{от } 0{,}20 \text{ до } 0{,}3.$$

Если обозначить через D_k диаметр и через L_k длину коллектора, то его удельная поверхность охлаждения, приведенная к неподвижному состоянию якоря, будет равняться:

$$a_k = \frac{\pi D_k \cdot L_k}{V_u + V_r}\cdot (1+0{,}1\cdot v_k) \qquad (454)$$

и повышение температуры

$$T_k = \frac{C_k}{a_k} = \frac{\text{от 70 до 120}}{a_k} \text{ градусов Цельсия} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (455)$$

Коэффициент C_k надо выбирать тем меньшим, чем лучше воздух обтекает коллектор с внутренней и наружной стороны и чем лучше отводится теплота через щетки. Для лучшей вентиляции обмотки якоря и коллектора часто является целесообразным делать соединения между якорной обмоткой и коллекторными пластинами из тонких и широких медных пластин.

Повышение температуры коллектора возможно расчитать заранее с большей или меньшей точностью лишь для безъискровой работы коллектора и щеток, так как при появлении искрообразования сильно увеличиваются потери в переходном слое и меняется постоянная C_k.

5. Нагревание подшипников.

Нагревание подшипников зависит от конструкции их и при данной конструкции от окружной скорости вращения цапфы v_2. При обычных констру циях подшипников при скоростях v_2 свыше 5 *м/сек* нагревание подшипников обыкновенно достигает такой величины, что приходится применять искусственное охлаждение. Последнее устраивается или при помощи воды, прогоняемой по змеевику, опущенному в масляный резервуар подшипника или заделанному непосредственно в корпус подшипника, или при помощи искусственной циркуляции (под давлением в 2—3 атм.) масла, затем проходящего по змеевик в водяном охладителе.

6. Нагревание и охлаждение закрытых машин.

Часто по условинм работы приходится герметически закрывать двигатели. В этом случае произведенная в двигателе теплота, пропорциональная полным потерям машины, может отводиться только через наружную поверхность корпуса мотора.

Повышение температуры в этом случае зависит от многих обстоятельств и не может быть выражено одной обще формулой. В качестве исходного пункта все-таки может в этом случае быть использована следующая:

$$T_g = \frac{2\,200 \cdot \Sigma_{потерь}}{(A_g + 2F)(1 + 0{,}1\,v_g)} \text{ градусов Цельсия}, \quad . \quad . \quad (456)$$

где T_g означает повышение температуры корпуса машины над температурой окружающего воздуха, $\Sigma_{потерь}$ — сумму всех потерь двигателя в ваттах, A_g в *см*² — свободную поверхность лучеиспускания корпуса, F_g в *см*² — часть поверхности корпуса, через которую может происходить отвод тепла благодаря теплопроводности, v_g — относительную скорость движения окружающего воздуха по отношению к корпусу машины в *м/сек*.

Если температура корпуса T_g определена, то температуры отдельных частей можно определить по указанным выше формулам для T_a, T_u, T_k, при чем эти повышения температур получатся над температурой кожуха. В формулах для T_a и T_k — скорость v надо положить равной нулю.

При одинаковых нормах нагрева при полном закрытии мотора его продолжительная мощность составляет всего около половины мощности открытого мотора.

Для улучшения охлаждения применяют ряд мер, например устройство на корпусе специальных охлаждающих ребер. Иногда прибегают к искусственному воздушному охлаждению.

Потребное количество воздуха для охлаждения рассчитывают следующим образом. Если T — допустимый перегрев машины, $\Sigma_{потерь}$ — сумма всех потерь в машине, то, допуская нагрев воздуха на $0{,}5\,T$ градусов, получим:

$$0{,}24 \cdot \Sigma_{потерь} \cdot 10^{-3} = 0{,}5\,T \cdot \gamma \cdot c \cdot Q\frac{дцм^3}{сек} \quad \ldots (457)$$

где γ — удельный вес воздуха, c — удельная теплота воздуха и $Q\frac{дцм^3}{сек}$ — количество прогоняемого воздуха в секунду в *дм*³. Отсюда потребное количество воздуха в минуту в *дм*³ равно:

$$Q_м = \frac{0{,}24 \cdot \Sigma_{потерь} \cdot 60}{0{,}5 \cdot T \cdot \gamma c \cdot 10^3}\, дм^3 \text{ в минуту} \quad \ldots (458)$$

При этом не учитывается отдача тепла через лучеиспускание, что дает известный запас.

Если принять для воздуха $c = 0{,}238$ и $\gamma = 1{,}20 \cdot 10^{-3}$, то получим:

$$Q_м \cong \frac{100 \cdot \Sigma_{потерь}}{T}\, дм^3 \text{ в минуту} \quad \ldots (459)$$

Если допустить нагревание воздуха только до $\frac{1}{3}T$, то потребное количество воздуха увеличится на 50%.

7. Измерение повышения температуры.

Как мы уже говорили, измерение повышения температуры согласно нормам производится у магнитов по повышению сопротивления, у всех остальных частей—при помощи термометра. При измерении местных нагревов на-ряду с определением по сопротивлению может быть использовано измерение при помощи термометров.

При расчете повышения температуры по увеличению сопротивления температурный коэффициент меди принимается равным:

$$\alpha = \frac{1}{235 + t_0} \quad \text{. . . . .} \quad (460)$$

Если R_{t_0} сопротивление обмотки (магнитов), соответствующее температуре t_0 градусов Цельсия, и R_{t_1} — сопротивление той же обмотки, соответствующее температуре t_1 градусов Цельсия, то, как известно

$$R_{t_1} = R_{t_0} [1 + \alpha (t_1 - t_0)] \quad \text{. . . . . . .} \quad (461)$$

Отсюда искомое повышение температуры T_m за протекшее между двумя измерениями время равно:

$$T_m = (t_1 - t_0) = (235 + t_0) \frac{R_{t_1} - R_{t_0}}{R_{t_0}} \text{ градусов Цельсия . . .} \quad (462)$$

Определение сопротивления R_t производится по отсчетам амперметра и вольтметра, включенных в цепь обмотки возбуждения, при чем вольтметр приключается к зажимам самой обмотки возбуждения. Отсчеты делаются через определенные промежутки времени без остановки машины. Как мы уже говорили, определенное по измерению сопротивления повышение температуры получается при нормальных конструкциях в 1,4 до 1,6 раз больше, чем по измерению термометром. Всякие покрышки и обкладки, которые нормально имеются на обмотках, при испытании не должны сниматься. Температура окружающего воздуха измеряется на расстоянии одного метра от машины на высоте середины машины. За последние четверть часа измерение температуры воздуха происходит через правильные промежутки времени, и берется среднее значение из этих отсчетов.

Измерение температуры якоря и коллектора (и подшипников) происходит при помощи термометров, для чего приходится через определенные промежутки времени останавливать машину. Для того чтобы машина не охлаждалась, необходимо отсчеты делать возможно скоро. Для последнего выгодно несколько подогревать термометр, считаясь с его предыдущим показанием. Термометр держат до тех пор, пока столбик ртути в нем не перестанет подниматься. Для лучшей теплопроводности шарик с ртутью термометра обертывают станиолью. Приложив термометр к якорю, его сверху прикрывают ватой или другим дурно проводящим материалом.

Измерение нагрева продолжают до тех пор, пока температура в машине не установится постоянная.

По нормам измерение температуры нагрева в больших машинах при постоянной нагрузке происходит через 10 часов. У малых же машин стационарное в отношении нагрева состояние машины обычно устанавливается раньше (через 5—6 часов и даже ранее).

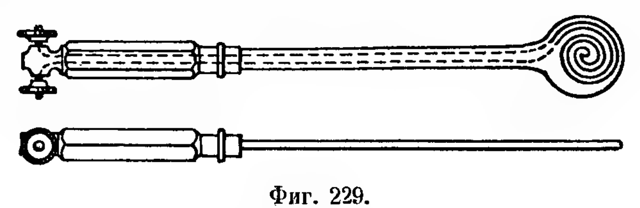
ГЛАВА ДЕВЯТАЯ.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОД ПОЛЮСАМИ И МАГНИТНОГО РАССЕЯНИЯ.

1. Определение кривой поля под полюсами.

При изучении машины, особенно при выработке новых типов, важно бывает иногда знать распределение магнитной индукции под полюсами по окружности якоря (см. фиг. 14, 15). Это распределение магнитной индукции, кроме уже упомянутого осциллографического способа (см. фиг. 16), можно получить также при помощи других, менее сложных приборов. Укажем некоторые из них.

а) Снятие кривой поля при помощи висмутовой спирали при неподвижной машине. Фиг. 229 показы-

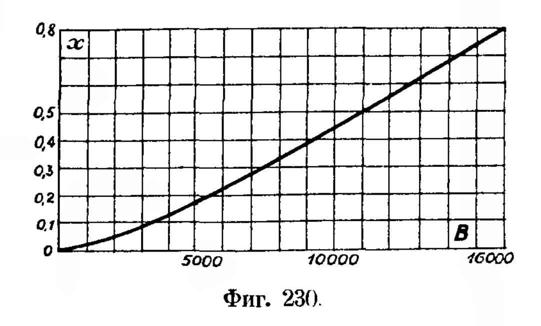


Фиг. 229.

вает такую спираль фирмы Hartmann и Braun. Она представляет собой тонкую бифилярно намотанную катушку, заделанную для защиты между двумя листочками слюды. Концы ее выведены к двум изолированным зажимам. Общая толщина спирали с изоляцие — около 1 *мм*, так что ее легко вставлять в очень узкие междужелезные пространства электрических машин.

Висмут обладает свойством менять свое омическое сопротивление при внесении его в магнитное поле. Это изменение сопротивления происходит в некоторой закономерной зависимости от интенсивности магнитного поля B. Таким образом, если известна опытная кривая такой зависимости, дающая зависимость

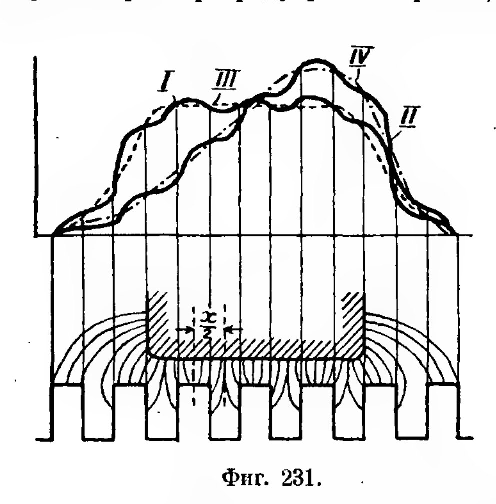
увеличения омического сопротивления (X) проволоки от магнитной индукции поля (см. кривую фиг. 230), то можно по наблюденному изменению сопротивления обратно сделать заключение о силе поля (B). Кривую легко проградуировать, измеряя магнитную индукцию поля каким-нибудь, например баллистическим, методом и одновременно определяя омическое сопротивление катушки. Так как сопротивление висмута зависит также от температуры катушки, то градуировочная кривая дается для какой-нибудь определенной температуры. Поправка на другую температуру делается по формуле:



Фиг. 230.

$$B_x = B\left[1 + a\left(t_x - t\right)\right], \qquad (463)$$

где t и B — температура и соответствующая ей магнитная индукция, при которой проградуирована кривая, а t_x и B_x — те же величины для действительно наблюдаемой температуры при измерении; $a = 0{,}00354$ — температурный коэффициент для висмута. Измерения производятся следующим образом. Через висмутовую спираль пропускается ток от вспомогательного источника тока, и присоединяются приборы, позволяющие измерять сопротивление спирали (мостик Витстона или амперметр и вольтметр).



Фиг. 231.

Окружность якоря (вернее полюсное деление) делят на части, позволяющие измерять сдвиг спирали в междужелезном пространстве в эл. градусах. Затем вдвигают спираль между полюсным башмаком и якорем, расположив ее по оси якоря машины. Сделав отсчет положения катушки в поле (в эл. градусах) и

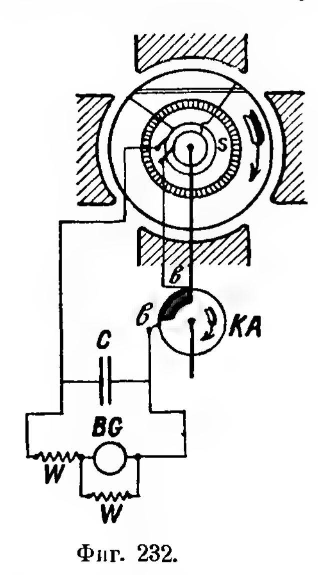
сопротивления, передвигают спираль в следующее положение по окружности якоря. Сдвиг спирали делают обычно каждый раз на половину деления зубца, располагая спираль то над зубцом, то над впадиной, чтобы учесть влияние на поле зубцов и впадин (см. фиг. 231). Полученные значения сопротивления, пересчитав на величину индукций, наносят на кривой (вроде кривой *I*, фиг. 231). Кривую сначала снимают для ненагруженной машины (кривая *I*), взяв возбуждение для магнитов, необходимое для получения нормального напряжения машины при холостом ходе.

Затем, выключив ток из обмотки возбуждения, от постороннего источника тока посылают ток в якорь, направлением и величиной соответствующий направлению и величине тока в якоре при нагрузке. Щетки должны при этом находиться в нормальном рабочем положении. При токе в якоре снова снимают кривую поля (поля реакции якоря на фиг. 231 не показано). Сложением полей реакции якоря и магнитов при холостом ходе получают результирующую кривую поля при нагрузке (кривая *II*, фиг. 31).

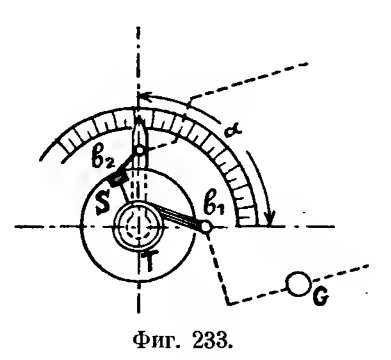
б) Аналогично висмутовой спирали можно найти распределение магнитной индукции под полюсом **при помощи узкой испытательной катушки** также при неподвижной машине. Берут узкую тонкую испытательную катушку из нескольких бифилярных витков тонкой проволоки, длиной равную длине якоря. Катушка также изолируется (можно просто тонким картоном). К концам катушки присоединяется гальванометр. Создавая в машине поле (так же, как в предыдущем случае), вставляем катушку в междужелезное пространство. Если теперь быстро вытащить катушку из магнитного поля, то гальванометр даст отклонение, пропорциональное величине магнитного поля, в котором катушка находилась. Таким образом, передвигая катушку по окружности якоря так же, как в предыдущем случае, мы найдем картину распределения магнитного поля по якорю при холостом ходе, поля реакции якоря, и затем сложением этих двух полей определим и результирующее поле при нагрузке.

Вместо того, чтобы каждый раз вытаскивать катушку из-под полюса, можно при малых машинах, оставляя катушку на месте, просто выключать ток из обмотки магнитов (или соотв. якоря). При машинах большей мощности во избежание пробоя изоляции обмотки магнитов необходимо параллельно последней включить соответствующее сопротивление.

в) Снятие кривой поля при помощи вращающейся испытательной катушки. Точное исследование распределения магнитного поля может быть произведено при помощи специальной катушки, состоящей из небольшого числа витков и наложенной на якорь согласно фиг. 232. Шаг витков этой испытательной катушки должен быть равен полюсному делению. Концы катушки присоединяются к двум контактным кольцам. С другой стороны к этим кольцам присоединяются замыкатель (шайба Жубера — см. фиг. 233) *KA* (на фиг. 232) и баллистический



Фиг. 232.



Фиг. 233.

гальванометр *BG*. Таким образом могут быть определены мгновенные значения эл.-дв. силы, индуктированной в катушке, при различных положениях последней в магнитном поле, являющиеся мерой величины магнитного поля в данном месте. Снятие кривых при холостом ходе и при нагрузке происходит, конечно, при вращающемся якоре. Можно также получить и отдельно кривую поля якоря, если вращать машину невозбужденной вспомогательным двигателем и пропускать нужный ток через якорь испытуемой машины.

Вместо того, чтобы к кольцам, соединенным с испытательной катушкой, присоединять замыкатель с гальванометром, можно присоединить вместо последних шлейф осциллографа. В этом случае при помощи осциллографа мы сразу получим всю кривую поля.

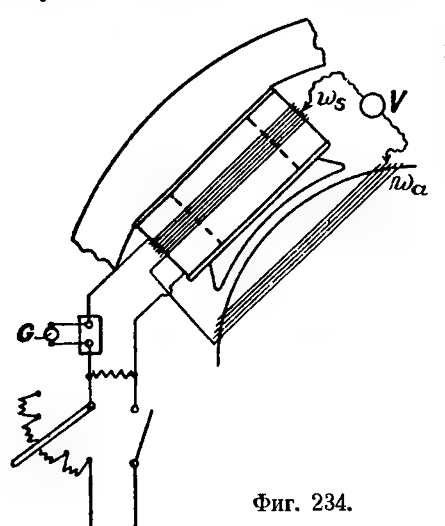
2. Определение коэффициента рассеяния.

Как мы указывали при рассмотрении магнитной системы, не все магнитные линии Φ_m, созданные намагничивающими ампер-витками магнитов, проходят через якорь, перерезывая

обмотку его, а только часть, равная Φ_a. Часть магнитных линий (Φ_s) рассеивается, замыкаясь через воздух. Под коэффициентом рассеяния мы подразумеваем отношение:

$$\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi_a} = \frac{\Phi_a - \Phi_s}{\Phi_a} = 1 + \frac{\Phi_s}{\Phi_a} \quad . \; . \; . \; . \; . \; (464)$$

Для определения этого коэффициента поступают легче всего следующим образом. Наматывают на магнитах и на якоре две катушки с известным числом витков, как показано на фиг. 234. Обе катушки включаются навстречу друг другу, и концы одной и другой катушки замыкаются на короткое через милливольтметр постоянного тока. Тогда, при изменении или выключении тока в главных обмотках магнитов, в намотанных на магнитах и на якоре катушках возбуждаются эл.-дв. силы, направленные обратно друг другу.



Фиг. 234.

Эти индуктированные эл.-дв. силы пропорциональны произведению из величины магнитного потока на число витков обмотки ($\Phi \cdot W$). Таким образом для того, чтобы включенный в цепь вспомогательных катушек милливольтметр не давал отклонения при изменении тока в шунтовой обмотке, необходимо, чтобы индуктированные в этих катушках эл.-дв. силы были равны между собой (они направлены навстречу друг другу), т.-е. если

$$\Phi_m W_m = \Phi_a W_a , \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (465)$$

где Φ_m и Φ_a — потоки в магнитах и в якоре, а W_m и W_a — число витков вспомогательных катушек на магнитах и на якоре. В этом случае

$$\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi_a} = \frac{W_a}{W_m} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (466)$$

Практически, намотав известное число витков обеих катушек, начинают число витков в одной из катушек изменять до тех пор, пока при выключении тока в магнитах милливольтметр не перестанет давать отклонения. В этом случае и имеют место

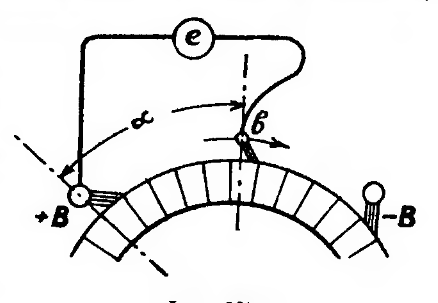
соотношения 465 и 466, из которых последнее определяет величину коэффициента рассеяния.

Вместо того, чтобы менять число витков намотанных вспомогательных катушек, иногда милливольтметр присоединяют между катушками при помощи подвижных контактов с острыми концами, могущими через изоляцию дать контакт с проводами катушек, при чем по желанию можно устанавливать нужное соотношение между числами витков обеих катушек.

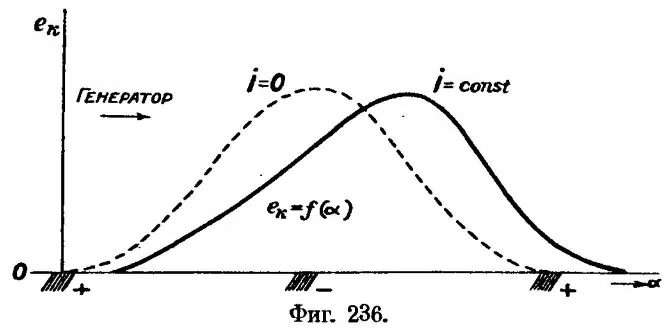
3. Определение потенциальной кривой коллектора.

При помощи добавочной тонкой щетки можно найти изменение потенциала по коллектору по отношению к одной из главных щеток.

Схему соединяют согласно фиг. 235, при чем между одной из главных щеток и вспомогательной включается вольтметр (когда вспомогательная щетка стоит рядом с главной щеткой другой полярности, вольтметр показывает полное напряжение машины, что надо иметь в виду при выборе вольтметра). Передвигая вспомогательную щетку b по отношению к неподвижной главной щетке $+B$, будем получать изменение потенциала по коллектору. Это изменение наносим на кривой в зависимости от углов α сдвига вспомогательной щетки.



Фиг. 235.



Фиг. 236.

Полученная таким образом потенциальная кривая коллектора ($I=0$) для холостого хода машины показана на фиг. 236. На той же фигуре помещена потенциальная кривая коллектора генератора при нагрузке ($I=\text{const}$).

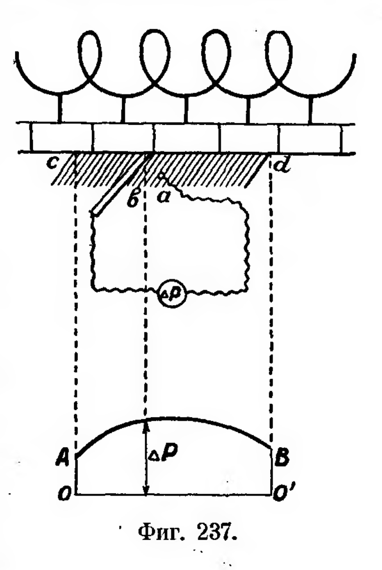
ГЛАВА ДЕСЯТАЯ.

ОПЫТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ КОММУТАЦИИ.

1. Определение потенциальной кривой под щетками.

Для более подробных исследований процессов коммутации приходится пользоваться осциллографом.

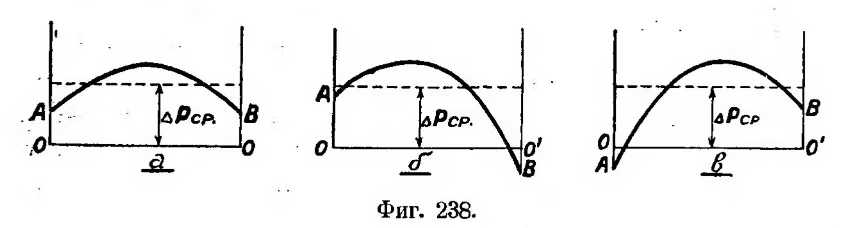
Здесь мы укажем только способ определения кривой распределения потенциала под щеткой, производимый более простыми средствами. Кривая распределения потенциала под щеткой дает представление о правильности условий коммутации. Как показывает опыт, потенциал самой щетки во всех ее точках даже при больших добавочных токах короткого замыкания, проходящих через щетку в поперечном направлении, остается почти одинаковым. Максимальная разность потенциалов между крайними точками (краями) щетки $c — d$ (см. фиг. 237) не превосходит сотых долей вольта.



Фиг. 237.

Если же при помощи тонкой медной вспомогательной щетки b измерять разность потенциалов ΔP между телом главной щетки и разными точками коллектора, то мы скоро увидим, что эта разность потенциалов по коллектору на ширине щетки cd не остается постоянной, а меняется по некоторому закону (по некоторой кривой). Типичные кривые распределения потенциала под щеткой показаны на фиг. 238 для генератора и на фиг. 239 для двигателя. При

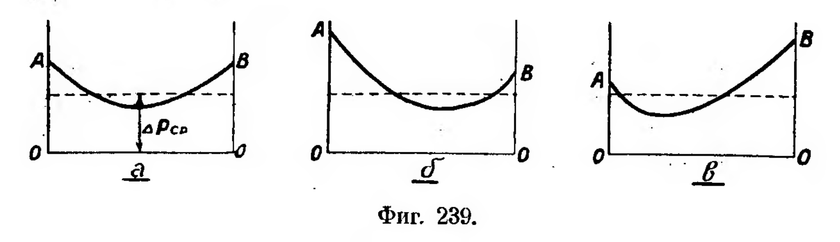
изложении коммутации было указано, что наиболее выгодные условия мы получим при приближении к прямолинейным условиям коммутации. Наибольшее приближение к прямолинейности получим тогда, когда разности потенциалов на обоих концах щетки (OA и $O'B$) будут одинаковы. Таким образом в случаях фиг. 238, *а* и 239, *а* мы имеем правильную коммутацию. При большей относительно величине разности потенциалов ΔP в начале комму-



Фиг. 238.

тации по сравнению с концом коммутации (фиг. 238, *б* и 239, *б*) имеем ускоренную коммутацию. Наконец в случае фиг. 238, *в* и 239. *в* имеем замедленную коммутацию. На фиг. 238 и 239, сторона A диаграмм соответствует набегающему краю щетки и сторона B — сбегающему.

При снятии потенциальных кривых обычно удовлетворяются определением потенциалов только трех точек: на набегающем конце щетки, на сбегающем и в середине.



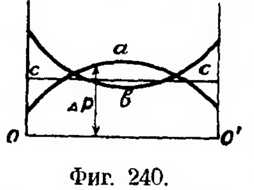
Фиг. 239.

В соответствии с этими кривыми можно установить необходимую величину сдвига щеток в машинах без добавочных полюсов в зависимости от нагрузок, с одной стороны, и от возбуждения, с другой стороны.

При машинах с дополнительными полюсами щетки нормально устанавливаются по геометрической нейтрали. Как мы уже упоминали при рассмотрении коммутации, практически потенциальные кривые под щеткой получаются или вида *a* или *b* (фиг. 240), в то время как для прямолинейности коммутации требовалась бы совершенно горизонтальная кривая. Форма потенциальной кривой

зависит главным образом от правильного выбора формы полюсных наконечников дополнительных полюсов, которую практически бывает трудно подобрать вполне удачно.

В случае кривой *a* мы имеем слишком сильную магнитную индукцию в воздушном зазоре под серединой дополнительного полюса. Наоборот, при кривой *b* магнитная индукция под серединой полюса относительно слаба.



Фиг. 240.

В случае идеальной кривой *c* в коротко замкнутых щеткой витках не получается дополнительных токов, замыкающихся через щетку в поперечном направлении, плотность тока по всей контактной поверхности щетки получается одинаковая, и коммутация проходит без искрения.

При изготовлении дополнительных полюсов обмотку их берут с достаточным запасом. Если при испытании оказывается перекоммутирование, то правильную установку дополнительных полюсов можно произвести следующими способами:

а) Увеличивают междужелезное пространство под дополнительными полюсами, для чего изменяют толщину металлических прокладок, имеющихся между этими полюсами и ярмом.

б) Шунтируют обмотку дополнительных полюсов при помощи некоторого сопротивления до нужной величины, при чем величина тока в этом шунте не должна превосходить 10% от нагрузочного тока, протекающего по обмотке дополнительных полюсов и

в) в случае необходимости шунтировки более, чем на 10% главного тока, снимают соответствующее число витков из обмотки возбуждения дополнительных полюсов.